

Bakalářská práce

**Návrh rámu pro Formula SAE electric**  
**Design frame of Formula SAE electric**

Jméno autora: Jan Piechaczek

Rok odevzdání: 2021

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta materiálově-technologická  
Katedra materiálů a technologií pro automobily

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Piechaczek**  
Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství  
Studijní obor: 3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl  
Téma: **Návrh rámu pro Formula SAE electric  
Design frame of Formula SAE electric**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí současného stavu
2. Analýza požadavků dle SAE
3. Konstrukční návrh rámu formule
4. Pevnostní analýza a doporučení pro další generace rámu

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1]ČSN ISO 690 Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32s.
- [2]ČADA, R. Technologie I: Zákony plastické deformace kovů, dělení materiálu, slévání: skriptum. 1. vyd. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2007. 75 s. ISBN 978-80-248-1274-8.
- [3]MUK, Jiří. Statika I. Vyd. 2. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03695-2.
- [4]ŠKAPA, Petr. Bezpečnost a zkoušení vozidel. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0757-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Buráň**

Datum zadání:

Datum odevzdání:

---

doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.  
vedoucí katedry

---

prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

## **ABSTRAKT**

V bakalářské práci se zabývám návrhem příhradového rámu pro elektrickou formuli v rámci soutěže Formula SAE. Práce obsahuje shrnutí požadavků na rám dle aktuálních pravidel soutěže, výběr vhodného materiálu a rozměrů pro stavbu formule a pojednává o tvorbě 3D modelu v softwaru Solid Works. Nakonec je model podroben pevnostní analýze.

**Klíčová slova:** rám, formule, Solid Works, návrh

In my bachelor's thesis I deal with the design of frame for an electric formula within the Formula SAE competition. The work includes frame requirements according to current competition rules, selection of suitable material and dimensions for the construction of the formula and describes creation of a 3D model in Solid Works software. Finally, the model is subjected to analysis.

**Key words:** frame, formula, Solid Works, design

## **Poděkování**

Tímto děkuji svému vedoucímu práce, panu Ing. Michalovi Buráňovi za cenné rady, rychlou odezvu a vstřícnost při vypracovávání této bakalářské práce.

## Seznam použitých značek a veličin

Znační	Název	Jednotka
$\varphi$	Úhel zkroucení	[°]
$\Delta z$	Posuv	[mm]
$t$	Rozchod kol	[mm]
$M_k$	Kroutivý moment	[Nm]
$K$	Torzní tuhost	[Nm/°]
$R_e$	Mez kluzu	[MPa]
$R_m$	Mez pevnosti	[MPa]
$E$	Youngův modul pružnosti	[GPa]
$I$	Plošný moment setrvačnosti	[mm <sup>4</sup> ]
$F$	Síla	[N]
$\tau_K$	Napětí v krutu	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_O$	Napětí v ohybu	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\mu_{Omax}$	Posunutí	[mm]

# Obsah

1. Úvod .....	1
2. O soutěži Formula Student.....	2
3. Současný stav.....	3
3.1 Typy ráků.....	3
3.1.1 Příhradový rám .....	3
3.1.2 Monokok.....	4
3.1.3 Kombinovaný rám .....	5
3.2 Torzní tuhost rámu.....	6
4. Analýza požadavků dle SAE .....	8
4.1 Struktura příhradové konstrukce.....	8
4.1.1 Hlavní oblouk a jeho vzpěry .....	9
4.1.2 Přední oblouk a jeho vzpěry .....	10
4.1.3 Přední přepážka .....	11
4.1.4 Boční nárazová oblast.....	12
4.2 Požadavky na kokpit.....	12
4.2.1 Šablona prostoru pro nohy pilota.....	12
4.2.2 Šablona vstupu do kokpitu.....	13
4.2.3 Šablona 95 % modelu muže .....	14
4.3 Materiálové požadavky.....	15
4.4 Deformační člen.....	17
5. Volba materiálu a rozměry profilů a trubek.....	19
6. Konstrukční návrh rámu formule.....	21
6.1 Nápravy a šablony .....	21
6.2 Struktura rámu .....	23
6.3 Tvorba objemového modelu .....	28
6.4 Výsledné návrhy .....	29

6.4.1 Návrh pro původní nápravy .....	29
6.4.2 Návrh pro upravené nápravy.....	31
7. Pevnostní analýza návrhu .....	35
7.1 Analýza rámu pro původní nápravy .....	36
7.2 Analýza rámu pro upravené nápravy .....	39
7.3 Výpočet torzní tuhosti a srovnání výsledků.....	41
8. Závěr .....	43
Seznam použité literatury .....	44
Seznam obrázků.....	46
Seznam tabulek.....	48
Příloha č. 1 Materiálová karta ocel ČSN 11 523 .....	49

# 1. Úvod

Cílem mé práce je vytvořit návrh rámu elektrické formule a provést jeho pevnostní analýzu v rámci soutěže Formula Student (též Formula SAE). Jedná se o konstrukční soutěž, ve které se studenti technických škol snaží postavit výkonnou, ale hlavně bezpečnou formuli určenou pro neprofesionálního závodníka. Formule je poté testována v řadě disciplín a porovnávána s konstrukcemi konkurenčních týmů.

Prvním krokem bude průzkum současně používaných rámu a pročítání pravidel soutěže, ve kterých jsou kladeny požadavky na materiál, přibližné rozměry a bezpečnostní prvky formule. Má vlastní práce pak bude zahrnovat výběr vhodného materiálu a profilů pro konstrukci rámu, vytvoření 3D modelu a následná pevnostní analýza.

Při vytváření modelu musím dodržovat nejen přísná pravidla soutěže, ale i požadavky ostatních komponentů. Nejpodstatnější budou nápravy, jejichž body uchycení udávají tvar přední a zadní části formule. V zadní části formule musí být také dostatečný prostor pro uchycení motoru. Modelovat budu v CAD systému Solid Works 2019, ve kterém je také možné provést pevnostní analýzu rámu. Analýza proběhne formou simulace, ve které bude výsledný návrh zatěžován určitými silami. Z výsledných grafů můžu poté vyčíst informace potřebné pro výpočet torzní tuhosti rámu a můžu tak posoudit jeho kvalitu.



## **2. O soutěži Formula Student**

Formula Student je konstrukční soutěž určená pro studenty technických vysokých škol, ve které je v současné době zapojeno přes 500 univerzitních týmů z celého světa. Soutěž vznikla v roce 1981 v USA pod názvem Formula SAE (Society of Automotive Engineers) a v Evropě se poprvé konala v roce 1998 jako Formula Student. [1]; [2]

Úkolem studentů je navrhnout a postavit vůz formulového typu, který musí disponovat velkým výkonem a musí být ovladatelný, spolehlivý, bezpečný, ekologický a zároveň na jisté estetické úrovni. Každý tým si přitom prostředky pro stavbu formule obstarává sám, prostřednictvím sponzorů. Vůz je poté porovnáván s návrhy konkurence v řadě bodově ohodnocených statických a dynamických disciplín. Celkově lze získat 1000 bodů.

### **Statické disciplíny:**

- Design – Komisaři hodnotí konstrukční návrh vozu, společně s doloženými výpočty a simulacemi. (150 bodů)
- Analýza nákladů – V analýze nákladů se hodnotí cena vozu a výrobní náklady v případné sériové výrobě. (100 bodů)
- Marketingový plán – Obhajoba plánu pro sériovou výrobu 1000 kusů prototypového vozu před fiktivní firmou. (75 bodů)

### **Dynamické disciplíny:**

- Akcelerační – Zrychlení formule s pevným startem na trati dlouhé 75 m. (75 bodů)
- Autokros – Jízda po technické trati, na které se hodnotí ovladatelnost, zrychlení a brždění. (150 bodů)
- Jízda v osmičce (Skid pad) – Jízda na trati ve tvaru osmičky, na které se hodnotí kvalita podvozku. (50 bodů)
- Vytrvalostní závod – Vytrvalostní závod na 22 km, ve kterém se prověří všechny systémy vozu, jeho funkčnost, spolehlivost a spotřeba paliva. (400 bodů)

### **3. Současný stav**

Na studentské formuli pracuji jako na zcela novém projektu, a proto musím začít důkladným pročítáním soutěžních dokumentací. Při navrhování rámu musím dodržet konstrukční požadavky obsažené v pravidlech soutěže, které se každým rokem aktualizují. Postupuji tedy podle nejnovějších pravidel (Formula Student Rules 2020). Rám musím také uzpůsobit motoru a nápravám. Jedná se ale pouze o koncept, a proto se budu řídit pouze podle přibližných rozměrů těchto komponentů. Jako pohonná jednotka poslouží třífázový elektromotor Emrax 188, který bude kvůli rozložení váhy a velikosti umístěn v zadní části formule. Vytvořit musím také úchyty pro zavěšení lichoběžníkových náprav. Nejdříve je však nutné vybrat typ rámu. V následující podkapitole proto rozeberu vlastnosti používaných typů rámu.

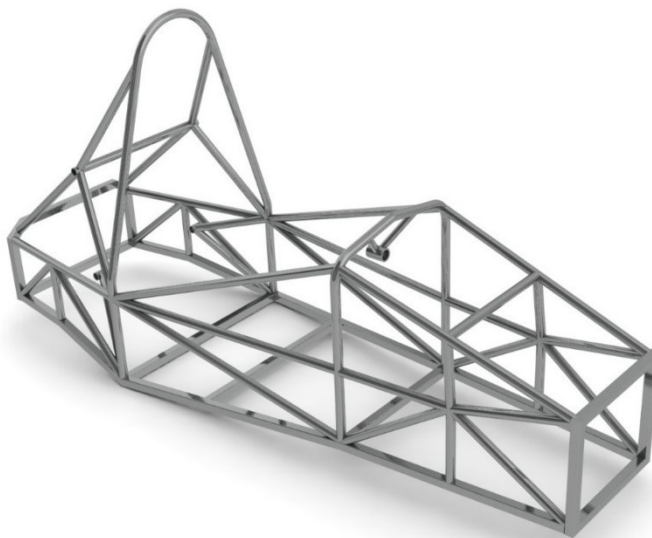
#### **3.1 Typy rámu**

Rám formule má několik funkcí. Představuje nosnou část vozidla, spojuje a chrání jednotlivé díly a zajišťuje ochranu pilota v případě havárie. Měl by být lehký, přitom ale dostatečně pevný a hlavně tuhý. Nejdůležitější vlastností rámu je právě torzní tuhost, která je jakýmsi ukazatelem kvality rámu. [3]

V současné době se v soutěži používá především jednoduchý trubkový rám nebo monokok z kompozitních materiálů. Pravidla umožňují také kombinaci těchto dvou typů.

##### **3.1.1 Příhradový rám**

Tento rám se vyrábí svařením trubek nebo profilů, které jako celek tvoří prostorovou příhradovou konstrukci (obr.1). Většina týmů volí tento typ rámu, protože je konstrukčně i finančně nenáročný, snadno opravitelný a lehce modifikovatelný. Právě díky dostupnosti a ceně materiálu, která je oproti monokoku nesrovnatelně nižší, je nejlepší volbou pro začínající týmy. Pro jeho stavbu lze využít ocel, hliníkové slitiny nebo i kompozitní materiály. Ve srovnání s monokokem je však jeho hmotnost při zachování stejných vlastností mnohem vyšší.



*Obrázek 1 Příhradová konstrukce týmu Dalhousie Formula SAE [4]*

### **3.1.2 Monokok**

Jedná se o skořepinu z kompozitních materiálů charakteristickou svou nízkou hmotností a zároveň vysokou pevností (obr. 2). Výroba monokoku je však velmi náročná jak po stránce technologické, tak finanční a vyžaduje stovky hodin práce. Kompozit navíc spadá do kategorie alternativních materiálů, a proto je nutné dodatečné testování na vzorcích.

Jako kompozitní materiál lze použít například uhlíková vlákna, která se po vrstvách vkládají do formy, zalévají se pryskyřicí a tvrdí v autoklávu. Již výroba samotné formy je ale velmi náročná, protože z důvodů zajištění shodné tepelné roztažnosti a stability při spékání, musejí být samotné formy vyrobeny z podobného materiálu. [4]

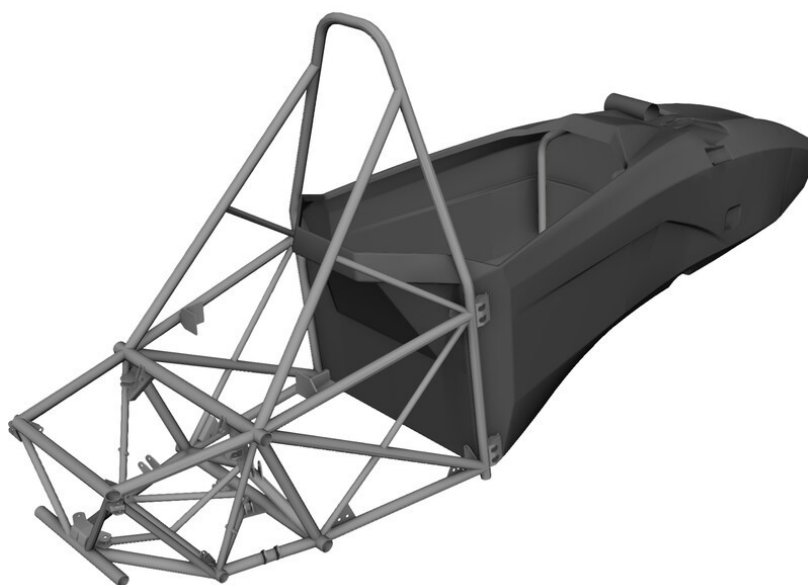
Oblíbeným řešením jsou takzvané hliníkové sendviče, které jsou oproti uhlíkovému monokoku levnější a méně náročnější na údržbu. Tyto sendvičové panely jsou kombinací tuhých hliníkových desek a lehkého voštinového jádra a vyznačují se schopností pohltit velké množství energie. Proto se také využívají jako absorbery kinetické energie.



*Obrázek 2 Uhlíkový monokok formule Umicore Eclipse [5]*

### **3.1.3 Kombinovaný rám**

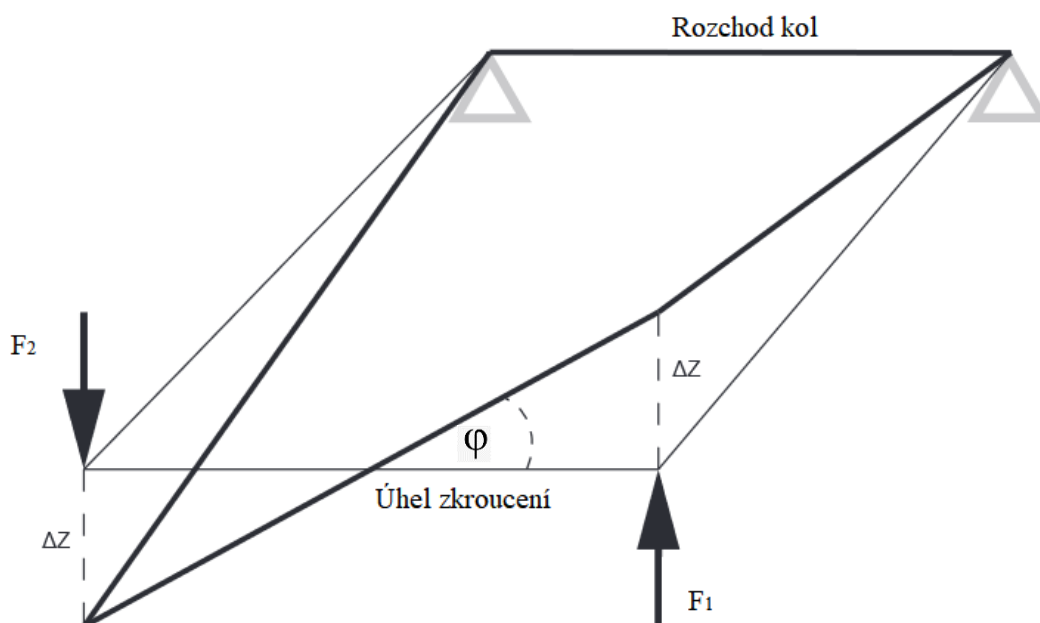
Tento typ rámu tvoří přední monokoková část a zadní příhradová konstrukce (obr. 3). Kombinuje tak nízkou hmotnost se snadnějším upevněním komponentů k rámu. Podle soutěže však spadá pod alternativní rámy, a proto je nutné jej podrobit dodatečným bezpečnostním testům podle Formula Student Rules 2020 a výsledky prezentovat soutěžní komisi.



*Obrázek 3 Kombinovaný rám [4]*

### 3.2 Torzní tuhost rámu

Jak jsem již zmiňoval, torzní tuhost je klíčový faktor při navrhování rámu. Můžeme ji chápat jako schopnost konstrukce odolávat zkroucení v podélné ose vozidla. Pokud by byla torzní tuhost příliš nízká, mohl by se vůz stát průjezdem zatáčkou neovladatelný. Torzní tuhost rámu můžeme určit pomocí hodnot získaných ze simulace nebo zkoušky namáhání krutem, jak je schematicky znázorněno na obrázku č. 4. [6]



Obrázek 4 Schéma zatížení rámu krutem [6]

Výpočet úhlu zkroucení je dán vztahem:

$$\varphi = \arctan \left( \frac{\Delta z}{\frac{1}{2} \times t} \right) \quad (1)$$

Kde  $\varphi$  [°] je úhel zkroucení,  $\Delta z$  [mm] posuv a  $t$  [mm] rozchod kol.

Výpočet kroutící moment je dán vztahem:

$$M_k = \frac{1}{2} \times t \times (F_1 + F_2) \quad (2)$$

Kde  $M_k$  [Nm] je kroutící moment,  $F$  [N] zatěžující síla a  $t$  [mm] rozchod kol.

Výpočet torzní tuhosti je dán vztahem:

$$K = \frac{M_k}{\varphi} \quad (3)$$

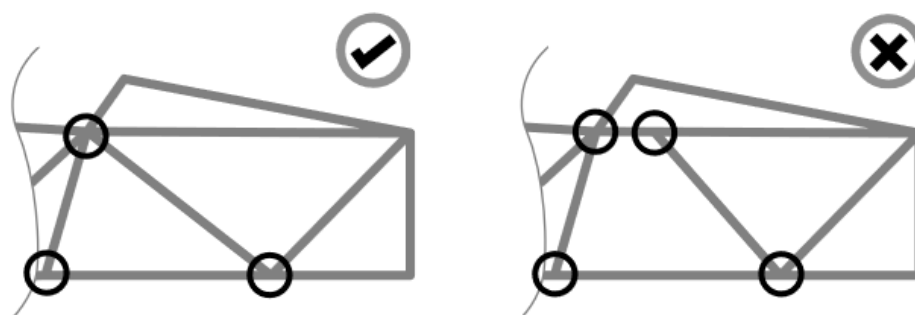
Kde  $K$  [ $Nm/^\circ$ ] je torzní tuhost,  $M_k$  [ $Nm$ ] kroutící moment a  $\varphi$  [ $^\circ$ ] úhel zkroucení.

## 4. Analýza požadavků dle SAE

V této kapitole se zaměřím na požadavky pravidel Formula Student Rules 2020 na příhradovou konstrukci, ve kterých jsou dány přibližné rozměry a tvar formule, materiálové požadavky a rozměry trubek a profilů. [2]

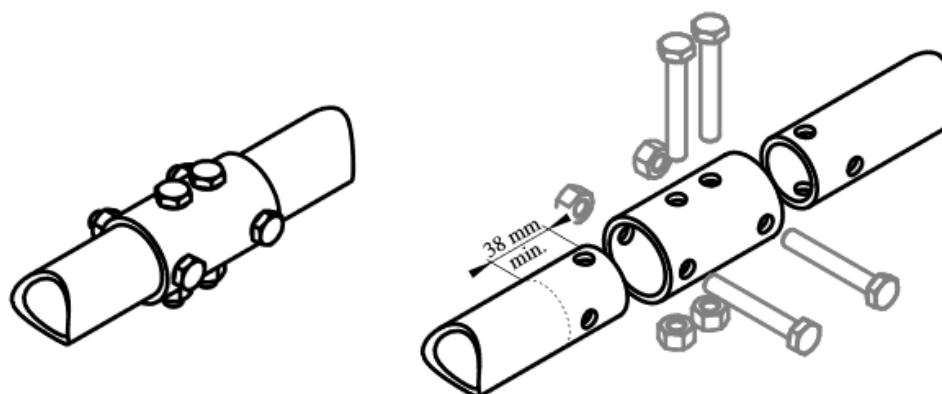
### 4.1 Struktura příhradové konstrukce

Primární konstrukce se musí skládat z hlavního a předního oblouku, vzpěr těchto oblouků, zadní podpory, boční nárazové oblasti, přední přepážky a podpory přepážky. Při spojování těchto členů v jeden celek je nutné dodržet pravidlo triangulace. Jedná se o trojúhelníkové uspořádání trubek do uzlů, jak je vidět na obrázku č. 5. Trubky tak vytvářejí tuhý rovinný útvar, který umožňuje přenos zatížení formou osových sil.



Obrázek 5 Princip triangulace (vlevo správně, vpravo špatně) [1]

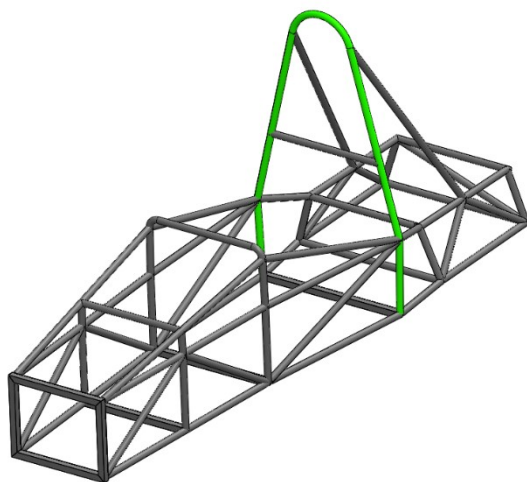
Části primární konstrukce musí být spojeny svárovým, případně šroubovým spojem. Šroubový spoj je ale nutné provést pomocí objímky o minimální délce 76 mm, která musí těsně přiléhat na spojované trubky, a šroubů M6 pevnostní třídy 8.8 (obr. 6).



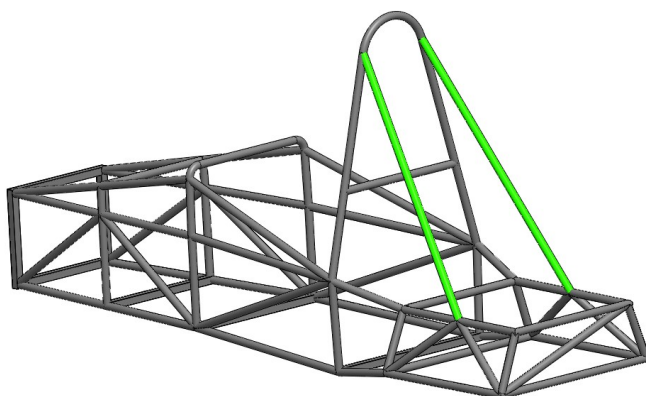
Obrázek 6 Šroubové spojení trubek [1]

#### 4.1.1 Hlavní oblouk a jeho vzpěry

Hlavní oblouk se nachází za sedadlem pilota a společně s předním obloukem jej chrání v případě přetočení vozidla. Musí být vyroben z jednoho kusu souvislé uzavřené trubky a může být skloněný maximálně o  $10^\circ$ . Šířka oblouku v místě jeho připojení k rámu musí být minimálně 380 mm. Podporovat ho musí alespoň dvě vzpěry z obou stran, které nesmí být připojeny níž než 160 mm od nejvyššího bodu oblouku. S obloukem musejí svírat úhel nejméně  $30^\circ$ . Jakékoliv ohyby nad horním připojením oblouku k příhradové konstrukci musí být také podpořeny přídatnými vzpěrami.



*Obrázek 7 Hlavní oblouk*

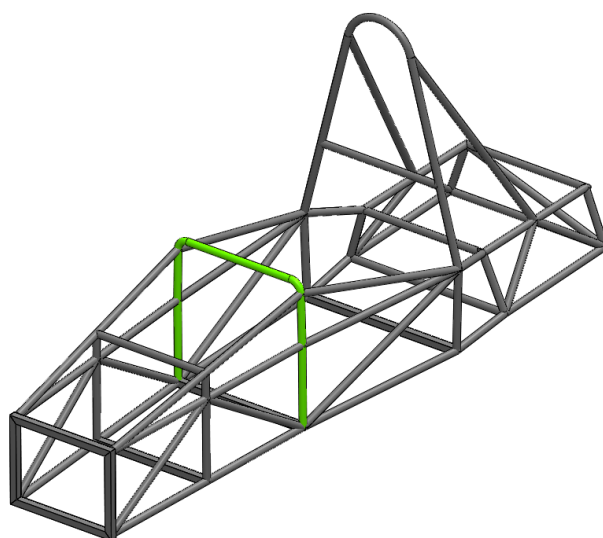


*Obrázek 8 Vzpěry hlavního oblouku*

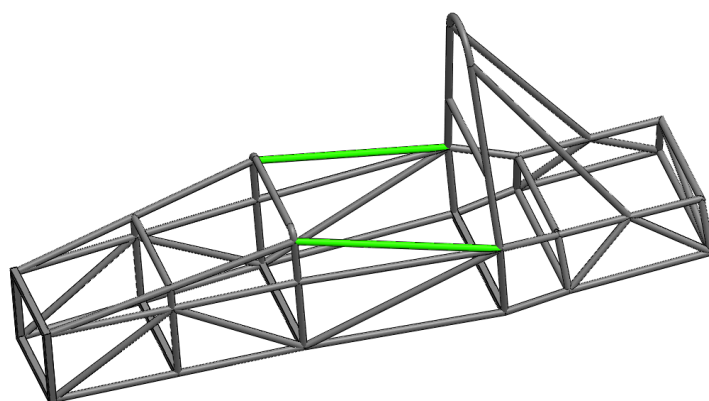


#### 4.1.2 Přední oblouk a jeho vzpěry

Přední oblouk musí být vyroben z jednoho kusu souvislé trubky nebo profilu. Pokud by byl oblouk vyroben z více dílů, musí být dodrženo pravidlo triangulace. Oblouk může být kompletně zalaminován. To znamená, že může být zapouzdřen laminátem po celém svém obvodu. Musí být podepřen dvěma rovnými vzpěrami a nesmí být připojený níž než 50 mm od nejvyššího bodu oblouku. Pokud by byl oblouk sklopen o více jak  $10^\circ$  musí být podepřen dalšími vzpěrami.



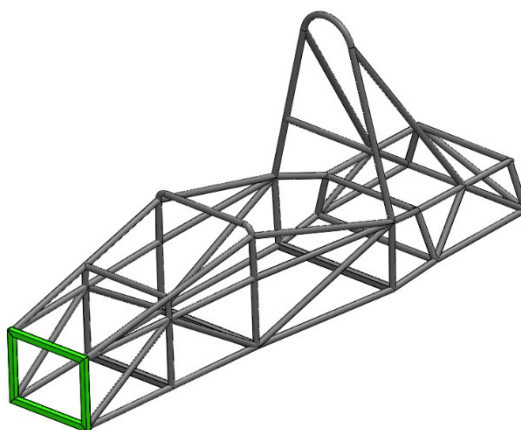
*Obrázek 9 Přední oblouk*



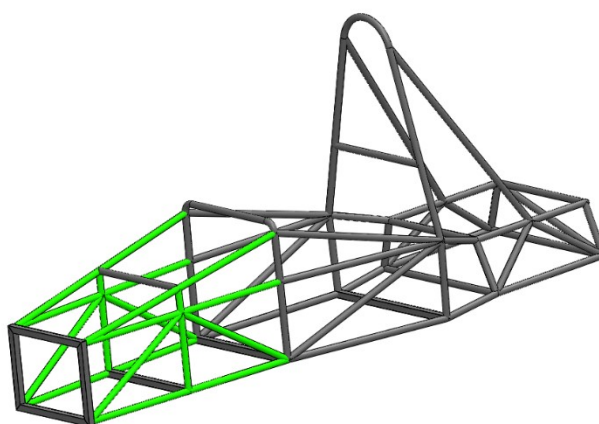
*Obrázek 10 Vzpěry předního oblouku*

### 4.1.3 Přední přepážka

Přední přepážka slouží k připojení deformačního členu ke konstrukci. Musí být podepřena minimálně třemi členy rámu z obou bočních stran a dvěma členy ze shora. Horní podpora musí být uchycena k přednímu oblouku maximálně 50 mm od jeho nejvyššího bodu. Spodní člen spojuje přepážku se základnou předního oblouku a diagonální člen zajišťuje triangulaci.



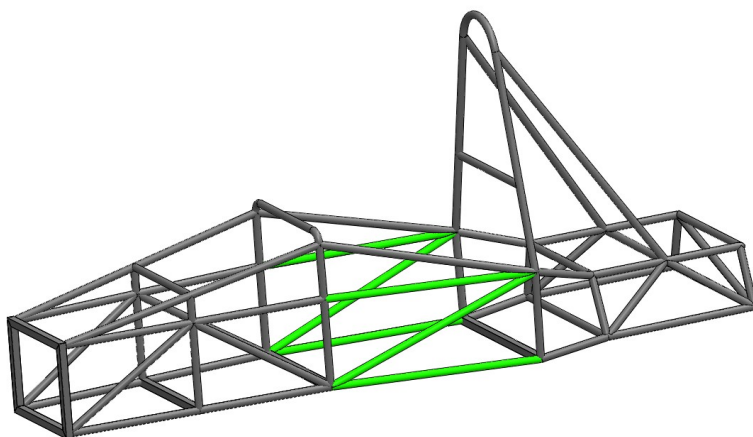
*Obrázek 11 Přední přepážka*



*Obrázek 12 Podpora přední přepážky*

#### 4.1.4 Boční nárazová oblast

Boční nárazová oblast chrání řidiče proti případnému nárazu a spojuje přední a hlavní oblouk. Musí být tvořena alespoň 3 členy z obou stran. Horní člen spojuje přední a hlavní oblouk ve výšce 240 mm až 320 mm od nejspodnějšího bodu rámu. Spodní člen pak spojuje přední a hlavní oblouk v tomto nejspodnějším bodě a diagonální člen zajišťuje triangulaci.



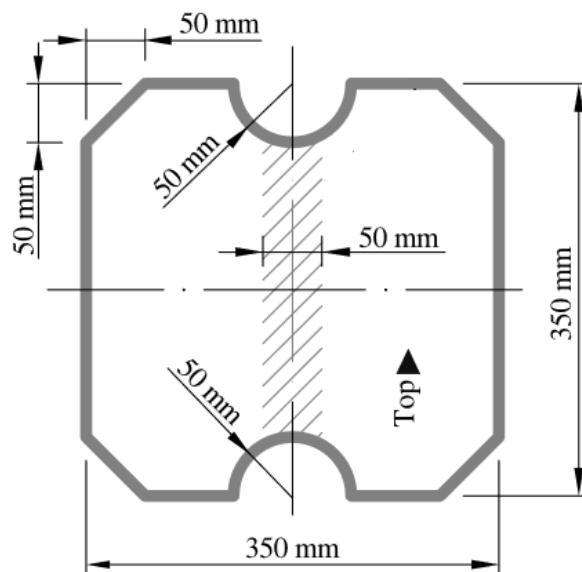
*Obrázek 13 Boční nárazová oblast*

#### 4.2 Požadavky na kokpit

Na kokpit jsou z hlediska bezpečnosti pilota kladeny nejpřísnější rozměrové požadavky. Řidič musí být v případě havárie schopen co nejrychleji a bez problému opustit kokpit. Proto je prostor pilota v bezpečnostních testech před vstupem do dynamických disciplín kontrolován podle tří šablon. Jedná se o šablonu vstup do kokpitu, šablonu prostoru pro nohy a šablonu 95 % modelu člověka.

##### 4.2.1 Šablona prostoru pro nohy pilota

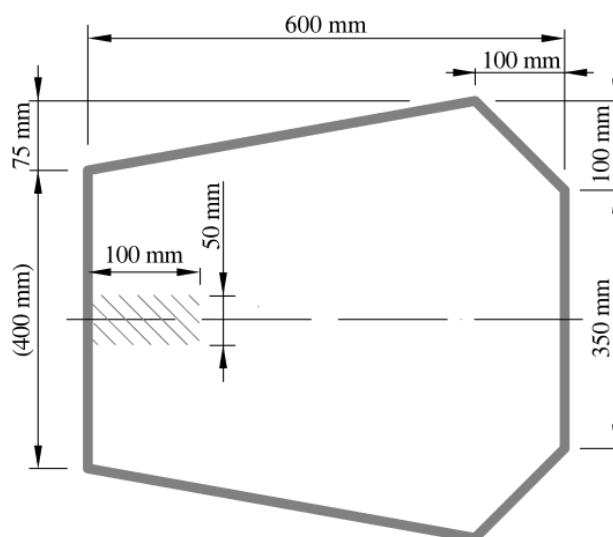
Touto šablonou se kontroluje, zdali má pilot dostatečný prostor pro nohy. Při zkoušce je šablona vnitřního průřezu posouvána horizontálně směrem od sedadla řidiče až do bodu 100 mm od nejvzdálenějšího pedálu v neaktivní poloze, přitom nesmí být v kontaktu s žádným prvkem rámu. Pokud jsou pedály nastavitelné, musí být jejich poloha nastavena na co nejbližší vzdálenost k sedadlu pilota. Při provádění zkoušky je povoleno vyndat z prostoru kokpitu volant a veškeré polstrování, které lze odstranit bez použití nástroje. (obr. 14)



Obrázek 14 Šablona prostoru pro nohy [1]

#### 4.2.2 Šablona vstupu do kokpitu

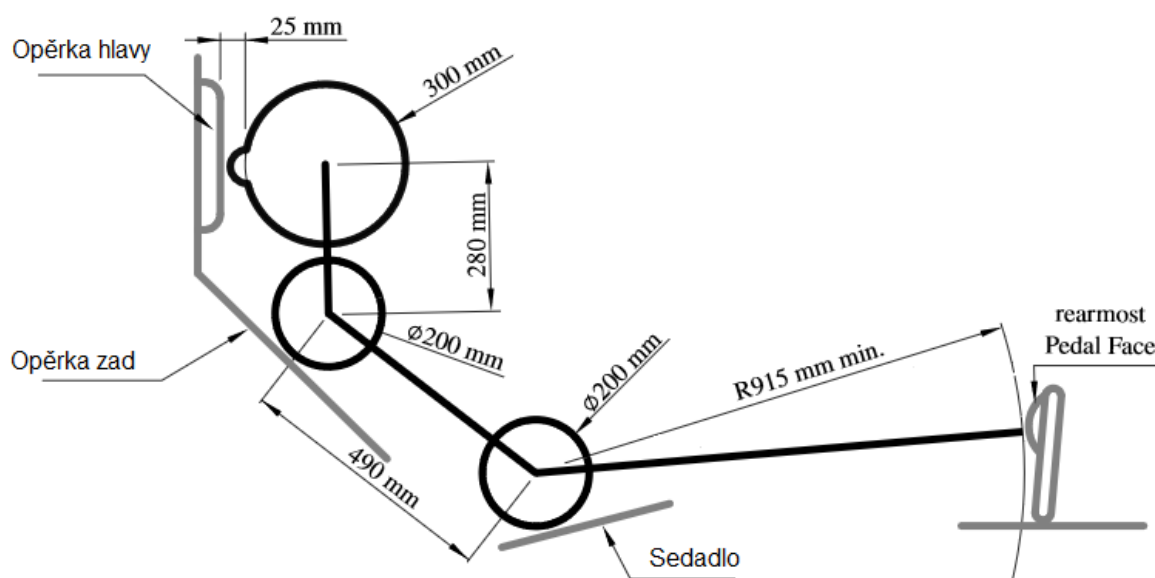
Tato šablona slouží ke kontrole vstupu do kokpitu. Je vkládána vertikálně a musí bez problému projít minimálně pod horní člen boční nárazové oblasti. Pravidla povolují při zkoušce odmontovat volant a sedačku, ovšem s řadící pákou a protipožární přepážkou nesmí být manipulováno. (obr. 15)



Obrázek 15 Šablona vstupu do kokpitu [1]

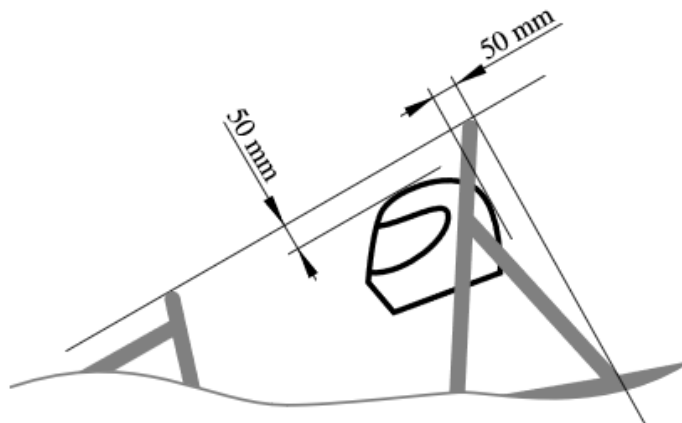
#### 4.2.3 Šablona 95 % modelu muže

Šablona je tvořena soustavou tří kružnic, které představují takzvaného 95 % člověka. První kružnice o průměru 300 mm reprezentuje hlavu pilota i s helmou. Hlava pilota navíc nesmí být vzdálená více jak 25 mm od opěrky hlavy. Druhá kružnice s průměrem 200 mm se nachází 280 mm od středu první kružnice a představuje pilotova ramena. Tato kružnice se musí dotýkat opěrky zad. Poslední kružnice, představující hýždě pilota, s průměrem 200 mm se nachází 490 mm od pilotových ramen a musí se dotýkat sedadla. Při vkládání šablony do kokpitu musí být sedadlo posunuto do nejzadnější polohy a nastavitelné pedály co nejvíce dopředu (obr. 16).



Obrázek 16 Šablona 95 % člověka [1]

Kontroluje se také pozice pilotovy hlavy vůči hlavnímu oblouku. Pokud je pilot usazen a připoután v sedadle, jeho hlava (i s nasazenou helmou) musí být vzdálena od pomyslné přímky spojující nevyšší body hlavního a předního oblouku minimálně 50 mm. Stejně vzdálená musí být pilotova hlava i od pomyslné přímky vedené od nejvyššího bodu oblouku ke konci jeho výztuhy. (obr. 17)



Obrázek 17 Pozice pilotovy hlavy vůči hlavnímu oblouku [1]

### 4.3 Materiálové požadavky

Podle pravidel soutěže je základním materiálem pro stavbu příhradového rámu nelegovaná ocel nebo nízkolegovaná ocel s maximálním obsahem 0,3 % uhlíku, 1,7 % manganu a 0,6 % jiných prvků. Všechny ostatní třídy oceli jsou považovány za alternativní materiály a vyžadují dodatečné testování. V tabulce číslo 1 jsem uvedl minimální vlastnosti oceli. Minimální rozměry profilů a trubek jsou uvedeny v tabulce číslo 2.

Tabulka 1 Minimální vlastnosti oceli

	Ocel	Svar
<b>Youngův modul pružnosti E</b>	200 GPa	200 GPa
<b>Mez kluzu <math>R_e</math></b>	305 MPa	180 MPa
<b>Mez pevnosti <math>R_m</math></b>	365 MPa	300 MPa

Tabulka 2 Minimální rozměry profilů a trubek

	Tloušťka stěny	Kvadratický moment průřezu
<b>Hlavní a přední oblouk, člen pro montáž ramenních bezpečnostních pásů</b>	2.0 mm	11 320 mm <sup>4</sup>
<b>Boční nárazová oblast, vzpěry oblouků, přední přepážka, člen pro montáž bezpečnostních pásů</b>	1.2 mm	8509 mm <sup>4</sup>
<b>Podpora vzpěr a přepážky</b>	1.2 mm	6695 mm <sup>4</sup>

V soutěži je ale také povoleno použití alternativních materiálů a rozměrů. Alternativní materiály mohou být použity na všechny části příhradové konstrukce s výjimkou hlavního

oblouku, pro který je z bezpečnostních důvodů předepsaná ocel. Pro všechny svařované části musí být také použita ocel, kromě předního oblouku, který může být vyroben ze hliníkové slitiny. Poslední podmínka se týká minimálních rozměrů, pokud je tloušťka stěny materiálu menší než 1,2 mm a kvadratický moment průřezu menší než 6695 mm<sup>4</sup>, bude materiál posuzován jako nevyhovující.

Jestliže se tým rozhodne pro použití alternativního materiálu nebo rozměrů, je nutné tento materiál otestovat pro splnění podmínky strukturní ekvivalence a je potřeba doložit technické komisi závodu dokument Structural Equivalency Spreadsheet (SES), ve kterém je tato podmínka splněna. Podmínka strukturní ekvivalence je dána vztahem:

$$E_1 \times I_1 \leq E_2 \times I_2 \quad (4)$$

Podmínka nám říká že součin Youngova modulu a kvadratického momentu průřezu alternativního materiálu musí být roven nebo větší než součin Youngova modulu a kvadratického momentu průřezu předepsaného materiálu.

#### 4.4 Deformační člen

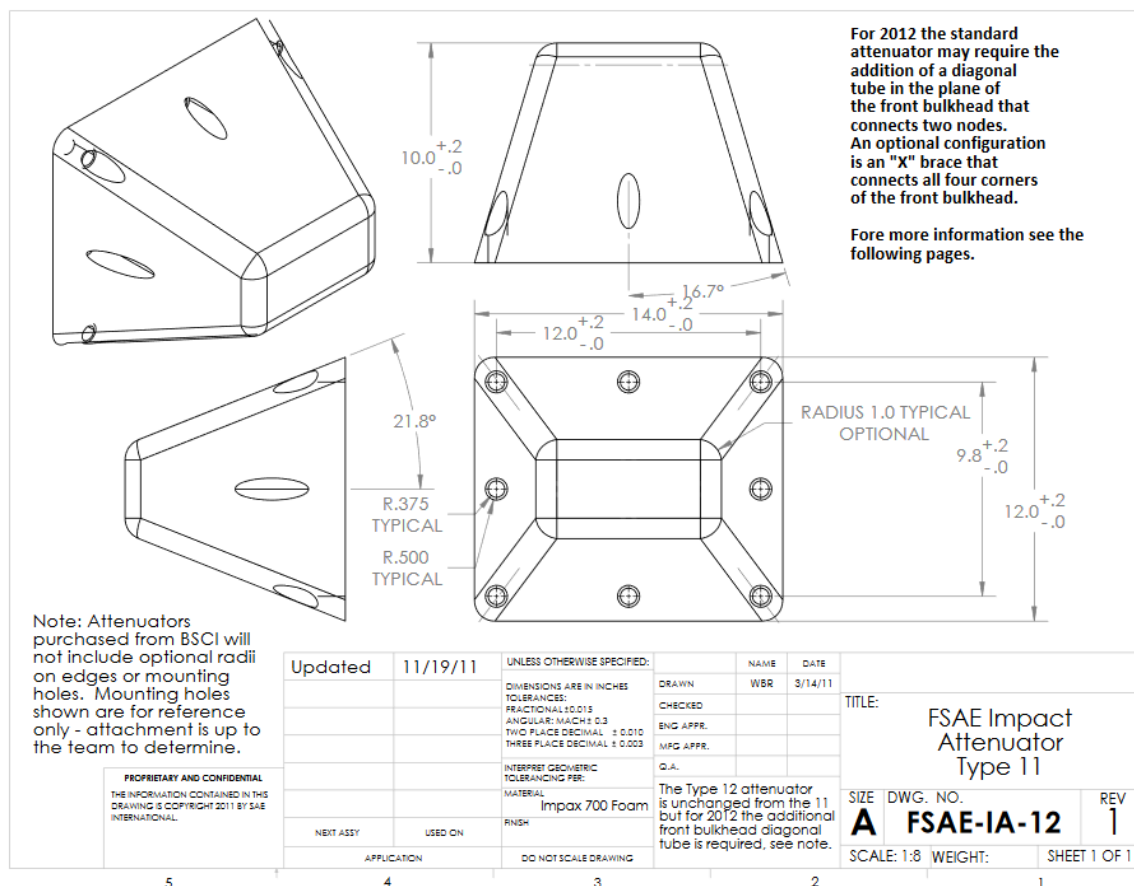
Všechny vozidla musí být podle soutěže vybaveny deformačním členem, který v případě nárazu pohlcuje energii a zajišťuje tak bezpečnost pilota. Pravidla obsahují soubor požadavků, podle kterých musí být: [1]

- Namontován na přední přepážku
- Uchycen na proti střepinový plech (AIP – anti intrusion plate), který zabraňuje proniknutí členu přední přepážkou.
- Alespoň 100 mm vysoký, 200 mm široký a 200 mm dlouhý.
- Navržen s uzavřenou přední částí.
- Navržen tak, aby nepřesahoval svými rozměry AIP

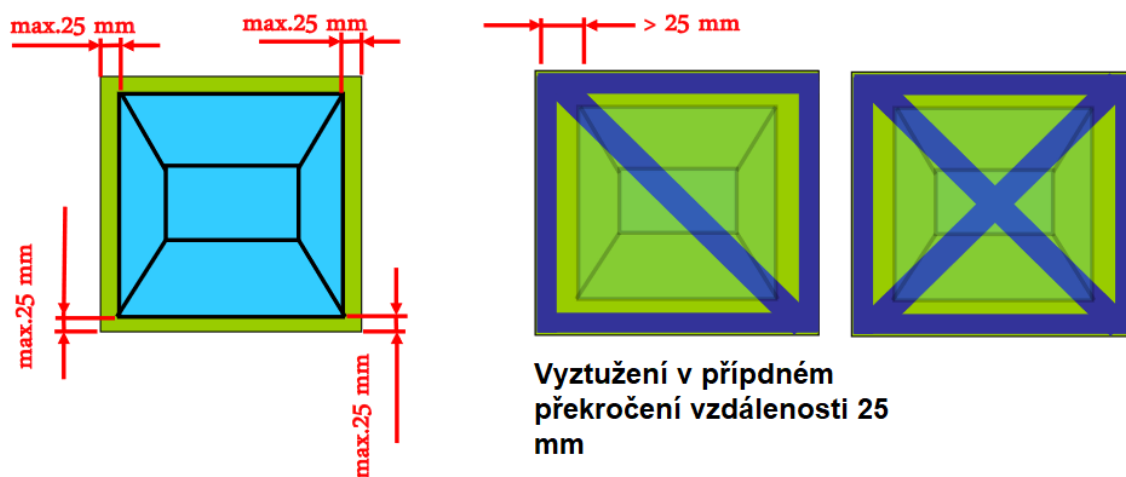
Proti střepinový plech, ke kterému je člen uchycen může být vyroben buď z oceli o tloušťce 1,5 mm nebo slitiny hliníku s tloušťkou 4 mm a jeho rozměry musí být stejné jako jsou rozměry přední přepážky. K přepážce může být buď přivařen nebo přišroubován minimálně 8 šrouby se závitem M8 pevnostní třídy 8.8. (obr. 19).

V současnosti se v soutěži vyskytují absorbéry z různých typů materiál, od hliníkových voštin až po polymerní pěny. Je možná také volba standartního typu absorbéro, který je nabízen přímo soutěžní organizací. Jedná se o absorbér vyrobený z materiálu Dow Impaxx® 700 s váhou 700 g, který byl již otestován, a proto nevyžaduje provedení nárazové zkoušky. Jeho rozměry jsou uvedeny na obrázku č. V případě že by hrana deformačního členu byla vzdálená od hrany přepážky více jako 25 mm, je nutné přepážku vyztužit, jak je vidět v na obrázku č. Pokud by nebyla vyztužena, musel by se i standartní absorbér podrobit nárazové zkoušce, při které se připevní k vozidlu, jehož hmotnost je 300 kg a rychlostí  $7 \text{ m.s}^{-1}$  narazí do pevné bariéry. Tato zkouška musí prokázat, že absorbovaná energie byla větší nebo rovna 7350 J a zpomalení bude v intervalu od 20 g do 40 g.





Obrázek 18 Rozměry standartního deformačního členu [10]



Obrázek 19 Případné vyztužení přepážky [10]

## 5. Volba materiálu a rozměry profilů a trubek

Jako materiál pro stavbu příhradové konstrukce jsem zvolil konstrukční ocel 11 523. Jedná se o nelegovanou jemnozrnnou jakostní ocel vhodnou ke svařování, která se běžně používá v automobilovém průmyslu. Z důvodu dobré svařitelnosti bude tato ocel použita na celý rám. Složení oceli je uvedeno v tabulce č. 3 s základní vlastni v tabulce č. 4. [7, 8]

Tabulka 3 Složení oceli 11 523

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Al</b>
0,200	1,600	0,550	0,050	0,045	0,015

Tabulka 4 Mechanické vlastnosti oceli 11 523

<b>Mechanická vlastnost</b>	<b>[MPa]</b>
<b>Re</b>	355
<b>Rm</b>	510–680

U vybírání rozměrů trubek a profilů jsem myslel jednak na co možná nejmenší hmotnost konstrukce, ale také na dostatečnou pevnost. Vybral jsem tak ideální rozměry s ohledem na dodržení podmínky minimálního kvadratického momentu průřezu.

Výpočet kvadratického momentu průřezu kruhových trubek je dán vztahem [10]:

$$I = \frac{\pi \times (D^4 - d^4)}{64} \quad (5)$$

Kde **I [mm<sup>4</sup>]** je kvadratický moment průřezu, **D [mm]** je vnější průměr trubky a **d [mm]** je vnitřní průměr trubky.

Výpočet kvadratického momentu průřezu čtvercového profilu je dán vztahem [10]:

$$I = \frac{a^4 - (a - 2 \times t)^4}{12} \quad (6)$$

Kde **I [mm<sup>4</sup>]** je kvadratický moment průřezu čtverce, **a [mm]** rozměr a **t [mm]** tloušťka stěny profilu.

V tabulce č. 5 jsem doložil rozměry členů primární konstrukce. Veškeré rozměry a hmotnosti jsem získal z katalogu. [9]

Tabulka 5 Rozměry profilů a trubek

Část konstrukce	Rozměr [mm]	Hmotnost [kg/m]	I [mm <sup>4</sup> ]
Hlavní oblouk	Ø25 x 2,5	1,387	11320,778
Přední oblouk	Ø25 x 2,5	1,387	11320,778
Boční nárazová oblast	Ø25 x 2	1,134	9628,196
Vzpěry oblouků	Ø25 x 2	1,134	9628,196
Přední přepážka	25x25x1,5	1,36	13 030,75
Trubka pro ramenní pásy	Ø25 x 2,5	1,387	11320,778
Trubka pro bederní pásy	25x25x1,5	1,36	13 030,75
Podpora vzpěr a přepážky	Ø 25 x 1,5	0,869	7675,745

Doložené výpočty pro rozměr Ø25 x 2,5 podle vzorce (5):

$$I = \frac{\pi \times (D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi \times (25^4 - 20^4)}{64} = 11320,778 \text{ mm}^4$$

Doložené výpočty pro rozměr Ø25 x 2 podle vzorce (5):

$$I = \frac{\pi \times (D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi \times (25^4 - 21^4)}{64} = 9628,196 \text{ mm}^4$$

Doložené výpočty pro rozměr Ø25 x 1,5 podle vzorce (5):

$$I = \frac{\pi \times (D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi \times (25^4 - 22^4)}{64} = 7675,745 \text{ mm}^4$$

Doložené výpočty pro rozměr Ø25 x 1,5 podle vzorce (6):

$$I = \frac{a^4 - (a - 2 \times t)^4}{12} = \frac{25^4 - (25 - 2 \times 1,5)^4}{12} = 11320,778 \text{ mm}^4$$

## 6. Konstrukční návrh rámu formule

Po pečlivém pročtení pravidel soutěže a zvolení vhodného materiálu a profilů jsem mohl začít s tvorbou prvního modelu. V této kapitole se tak zaměřím na vytváření návrhu rámu v CAD softwaru Solid Works 2019.

Jak jsem již zmiňoval, jednou z hlavních funkcí rámu je spojování ostatních komponentů do jednoho celku. Rám se tak musí jednotlivým komponentům uzpůsobit. Z konkrétních dílů mám ovšem k dispozici pouze první návrhy náprav a elektromotor Emrax 188 a přesné rozměry akumulátorů, převodovky, pedálů, řízení a dalších dílů nemám k dispozici. Výsledný návrh proto bude jakýmsi základem pro další operace a neustálé upravování a který se bude řídit především pravidly soutěže.

### 6.1 Nápravy a šablony

Prvním a nejdůležitějším krokem pro vytvoření návrhu je získání bodů úchytů náprav k rámu. Nápravy určují přibližný tvar a velikost rámu a nelze bez nich začít modelovat. Tyto body jsem si obstaral z bakalářské práce Jakuba Sandlera [11], který se zabýval návrhem zavěšení kol Formula student. V tabulce č. 6 se nacházejí optimalizované body úchytů ramen přední nápravy.

Tabulka 6 Uchycení přední nápravy

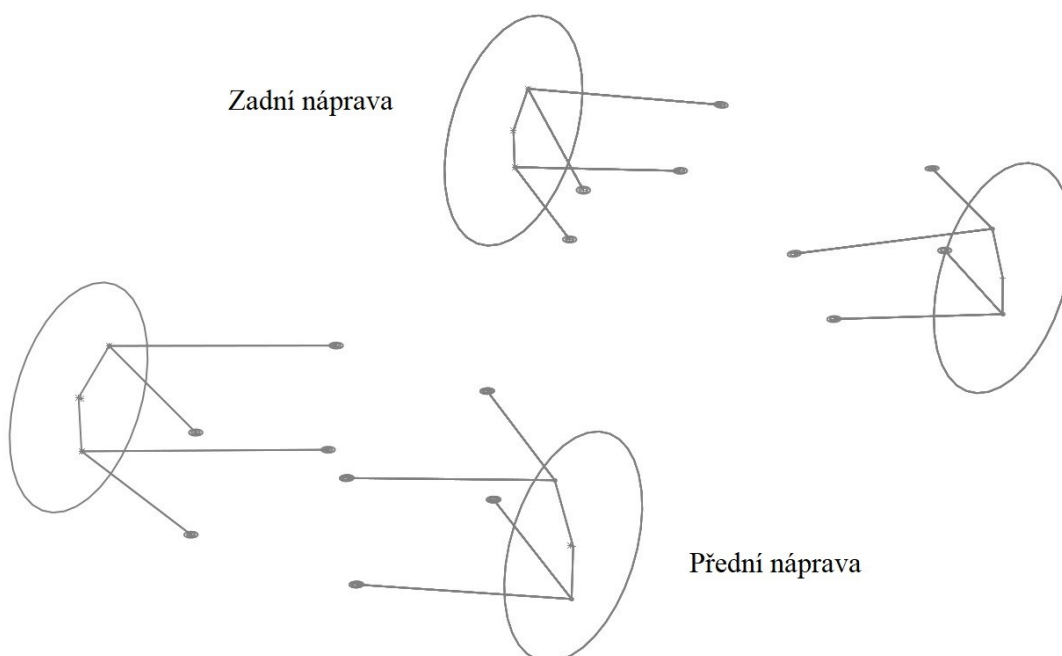
Název	x	y	z
Úchyt č.1 (horní rameno)	-770	-200.05	370
Úchyt č.2 (horní rameno)	-250	-200.05	370
Úchyt č.3 (spodní rameno)	-766	-219	119
Úchyt č.4 (spodní rameno)	-258	-219	119
Horní kulový čep	-490	-590	381
Dolní kulový čep	-515	-649	123

A v tabulce č. 7 se pak nacházejí optimalizované body úchytů ramen zadních náprav, společně s jejich uchycením k těhlici.

Tabulka 7 Uchycení zadních náprav

Název	x	y	z
Úchyt č.1 (horní rameno)	775	-279,4	310
Úchyt č.2 (horní rameno)	1285	-279,4	310
Úchyt č.3 (spodní rameno)	820	-350	155
Úchyt č.4 (spodní rameno)	1230	-350	155
Horní kulový čep	1040	-615	355
Dolní kulový čep	1030,4	-646	163,0

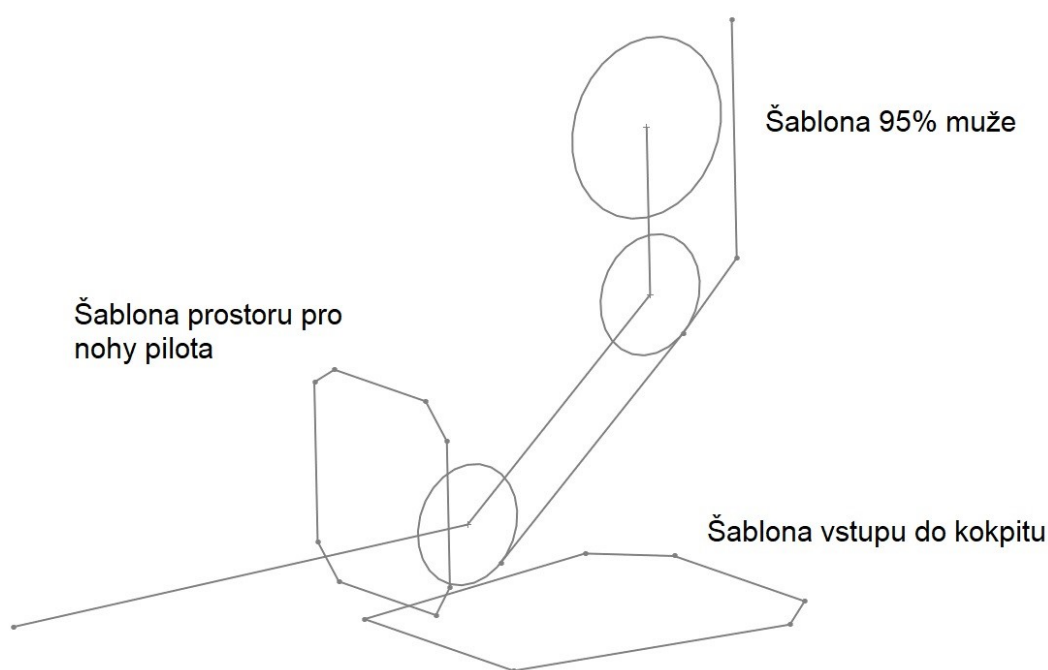
Potřebná data jsem pak mohl exportovat do nového souboru softwaru Solid Works, ve kterém jsem si vytvořil prostředí pro svařování. Data jsem zadával prostřednictvím funkce 3D skici v podobě bodů se souřadnicemi x, y, z. Následně jsem body spojil a vytvořil tak pomocný náčrtek náprav, který budu později potřebovat k načrtnutí skic přední a zadní podpůrné struktury. Na konci ramen náprav jsem si také znázornil úchyty určené pro osazení kulovým čepem a připevnění k rámu, a abych se vyhnul nechtěným kolizím, nastavil jsem jim pevnou vazbu (obr. 20).



Obrázek 20 3D skica přední a zadní nápravy

Získat optimalizované body úchytů nebylo snadné, protože se ve stejnou dobu začal navrhovat rám i zavěšení náprav. Body úchytů se tak neustále měnily a musel jsem daným požadavkům návrh rámu neustále přizpůsobovat.

Kromě náprav jsem si připravil i kontrolní šablony vstupu do kokpitu, prostoru pro nohy řidiče a také šablonu 95 % muže. Šablony jsem si načrtnul do určitých rovin a zviditelnil jsem je, aby mi tak neustále pomáhaly dodržovat konstrukční pravidla soutěže (obr. 21).

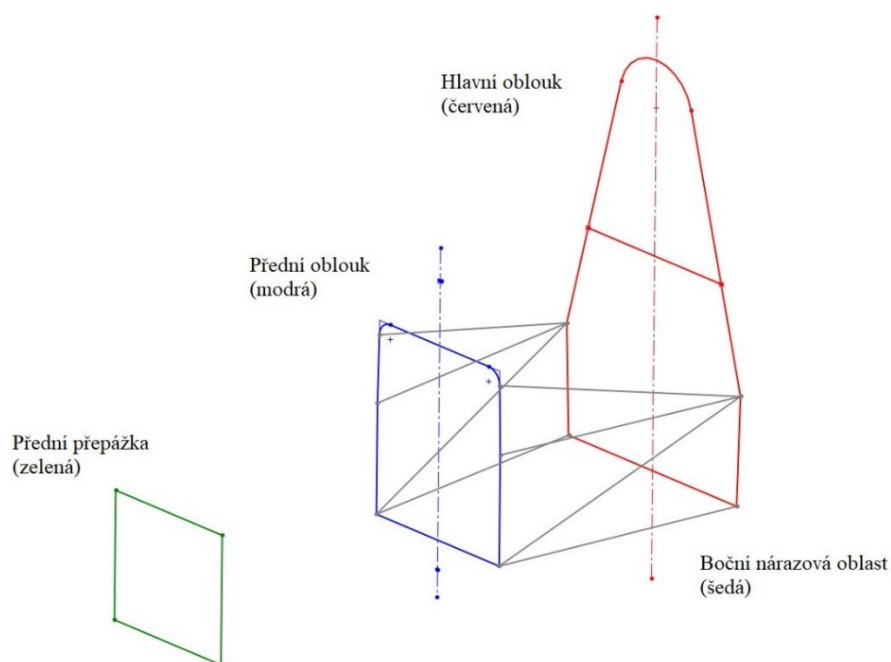


*Obrázek 21 Kontrolní šablony*

## 6.2 Struktura rámu

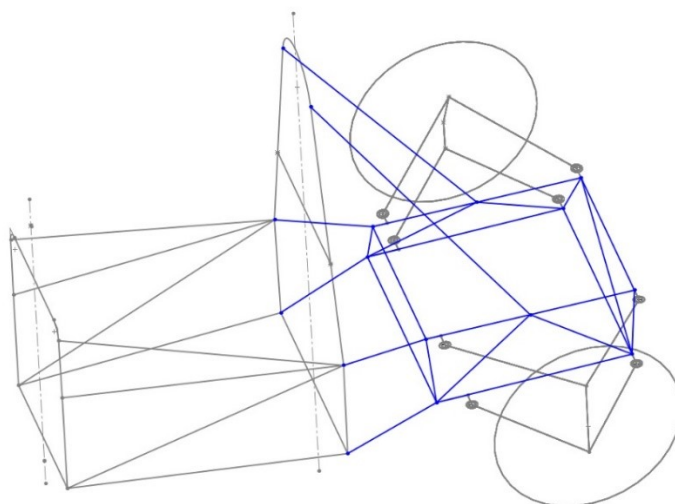
Po načrtnutí náprav a kontrolních prvků jsem se mohl věnovat rámu samotnému. Abych mohl vytvořit plnohodnotný objemový model, musel jsem si vytvořit 3D skicu struktury rámu. Začal jsem tak s návrhem hlavního a předního oblouku a přední přepážky. Pomocí referenční geometrie jsem si do prostoru přidal 3 nové roviny rovnoběžné s původní rovinou pravou. V těchto rovinách jsem pak postupně vytvořil skici oblouků a přepážky a roviny rozmístil prozatím přibližně podle kontrolních šablon. Oblouky jsem poté spojil pomocí 3D skici boční nárazové struktury tak, abych nezasahoval do nákresu šablony vstupu do kokpitu. Poté jsem se

mohl zabývat přední a zadní podpůrnou strukturou, což byl úkol nejnáročnější, protože jsem musel vyřešit připojení náprav k těmto členům (obr. 22).



*Obrázek 22 rozmístění prvků rámu*

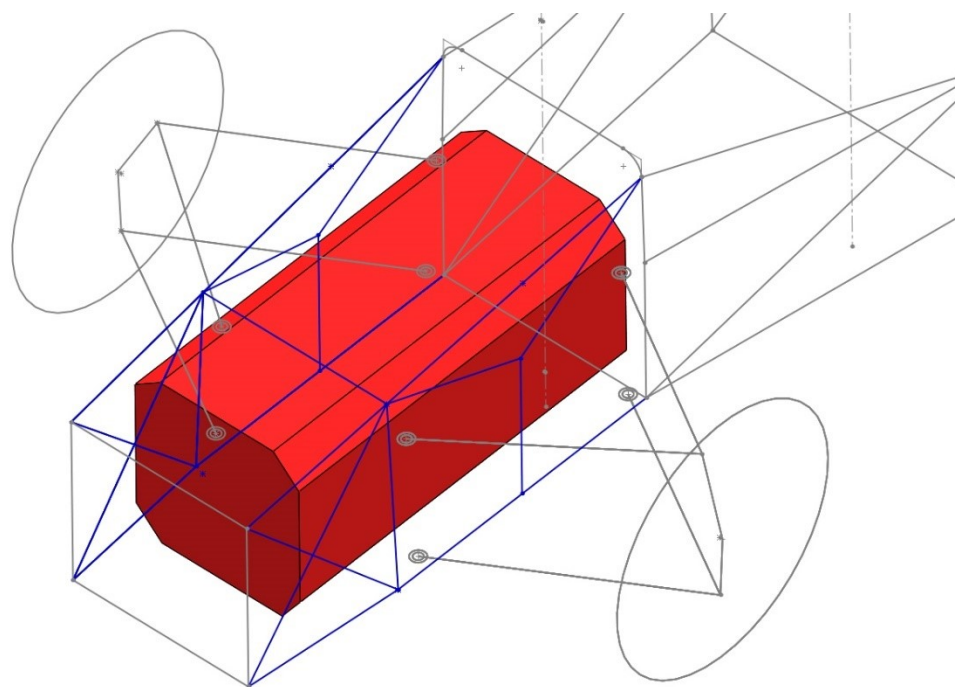
Při navrhování zadní podpůrné struktury jsem myslel jednak na uchycení nápravy, ale také na velikost elektromotoru o průměru 188 cm. Ponechal jsem tak zde dostatek místa pro upevnění a rozmístění pohonné jednotky a budoucích komponentů. Nápravy jsem k zadní struktuře připojil s 40 mm rezervou pro upevnění úchyťů. Nakonec jsem podpořil hlavní oblouk dvěma vzpěrami (obr. 23).



*Obrázek 23 Zadní podpůrná struktura*

Nakonec už jen stačilo propojit přední přepážku a oblouk pomocí podpůrné struktury. Během navrhování přední podpůrné struktury jsem ale narazil na problém. Pozice úchytů ramen přední nápravy mi nedovolovala dodržet pravidla soutěže a prvky rámu by tak zasahovaly do prostoru pro nohy pilota a bohužel již nebylo možné nápravu upravit. Samotná pozice ramen nápravy do kontrolního prostoru nezasahuje, ale profil s úchytem pro tuto nápravu by kontrolní prostor narušil. Snažil jsem se tak nejružnějšími návrhy přední struktury nápravy k rámu připojit. Přemýšlel jsem nad řešením, že nápravu připojím ke struktuře z boku, jak je znázorněno na následujícím obrázku (obr. 24).





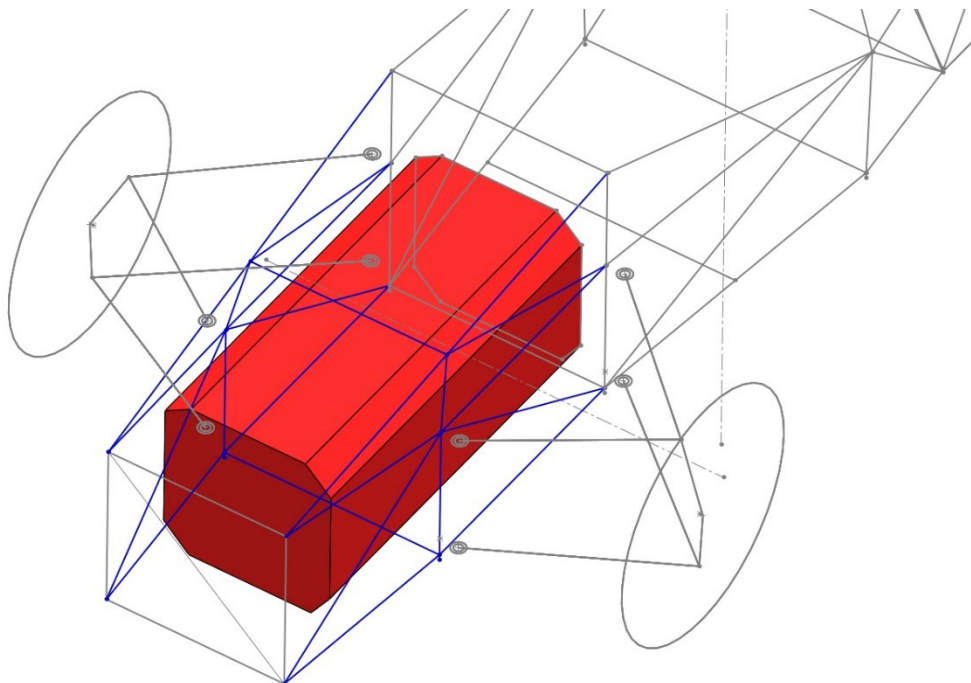
*Obrázek 24 Přední podpůrná struktura*

Červeně vyznačená zóna znázorňuje prostor pro nohy pilota a modrou barvou je označen návrh přední podpůrné struktury. Úchyty jsem zamýšlel připojit z boku k profilům předního oblouku, a právě řešené podpůrné struktuře. Avšak toto řešení mi nedovolovalo dodržet pravidlo triangulace a taky jsem nemohl nápravy připojit v takzvaných uzlech neboli místech s nejvyšší tuhostí rámu. Toto řešení proto nevyhovovalo a musel jsem problém vyřešit jinak. Jak jsem již zmiňoval, jedná se o první návrh rámu i náprav a snažil jsem se tak rám uzpůsobit hlavně pravidlům soutěže. Proto jsem byl nucen upravit si pozice úchytů náprav. Snažil jsem se pozice upravit jen nepatrně, žádným způsobem nezasahovat do rozvoru a rozchodu formule, jen jsem posunul pozice úchytů ve směru y, z. V následující tabulce jsou uvedeny upravené body úchytů.

Tabulka 8 Upravené úchyty přední nápravy

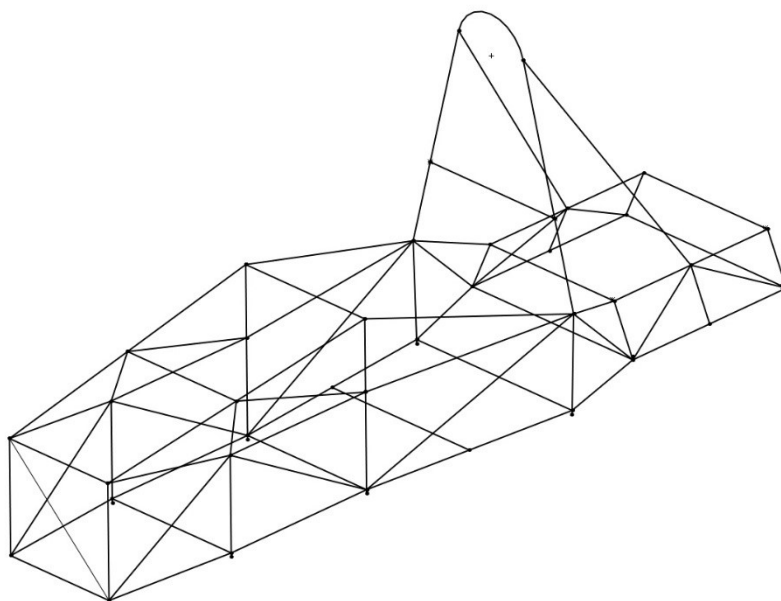
Název	x	y	z
Úchyt č.1 (horní rameno)	-770	-270	380
Úchyt č.2 (horní rameno)	-250	-270	380
Úchyt č.3 (spodní rameno)	-766	-270	119
Úchyt č.4 (spodní rameno)	-258	-270	199

S upravenými body náprav jsem mohl podpůrnou strukturu v pořádku navrhnout. Stejně jako u zadní podpory jsem nechal 40mm rezervu pro vytvoření budoucích úchytů náprav. Kromě základních členů jsem do struktury přidal i vyztužující členy a členy zajišťující triangulaci (obr. 25).



*Obrázek 25 Přední podpůrná struktura – upravená náprava*

První skicu primární struktury rámu jsem tak měl hotovou. Stačilo jen dodělat poslední úpravy v podobě vyztužujících členů a zkontrolovat triangulaci prvků. K výsledné skici jsem se ale v průběhu modelování neustále vracel a upravoval ji podle potřeb. Nejčastěji jsem upravoval právě přední a zadní struktury a také rozmístění jednotlivých oblouků. Po několika pokusech a úpravách jsem tak navrhnul vyhovující skicu připravenou k dalším operacím (obr. 26).



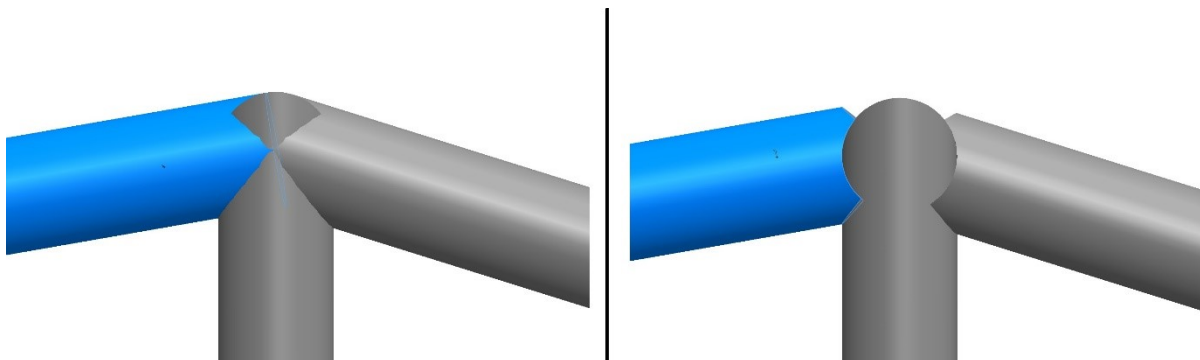
*Obrázek 26 Skica rámu*

### **6.3 Tvorba objemového modelu**

K vytvoření objemového modelu z navrhnuté 3D skici mi pomohla funkce vložit profil, která mi umožnila označit jednotlivé paprsky návrhu a z knihovny profilů jim přiřadit určité průřezy. Profily určené pro stavbu studentské formule se ale v knihovně nenacházejí, a proto jsem si je musel nejdříve vytvořit. Toho jsem snadno docílil načrtnutím a okótováním průřezů vybraných trubek a profilů do skici, které jsem poté uložil do knihovny.

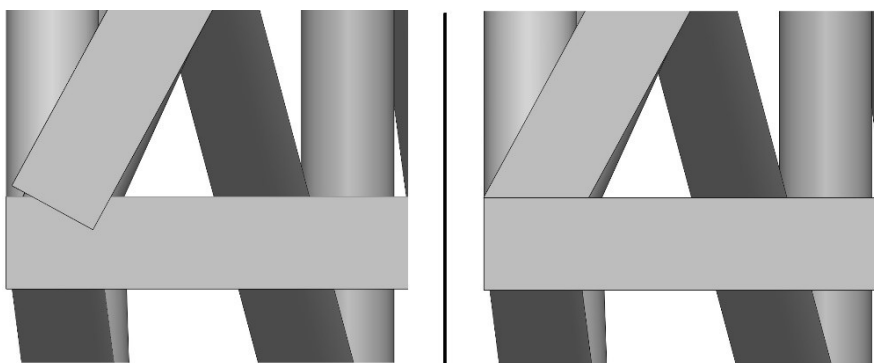
Po vytvoření a uložení všech průřezů do knihovny jsem mohl začít s vkládáním profilů do skici. Jako první jsem vložil trubku  $\varnothing 25 \times 2,5$  mm pro hlavního a předního oblouku. Poté byly oblouky spojeny boční nárazovou oblastí pomocí trubek  $\varnothing 25 \times 2$  mm. Přední přepážka byla vytvořena z profilu  $25 \times 25 \times 1,5$  mm. Poté jsem svařovanou konstrukci spojil pomocí trubek podpůrných struktur  $\varnothing 25 \times 1,5$  mm. Do hlavního oblouku jsem zakomponoval trubku pro montáž bezpečnostních pásů  $\varnothing 25 \times 2,5$  mm a na zadní podpůrnou strukturu jsem vložil vzpěry o rozměrech  $\varnothing 25 \times 2$  mm. Nakonec jsem celou konstrukci vyztužil pomocí profilů  $25 \times 25 \times 1,5$  mm. Tyto rozměry jsem použil pro první návrhy rámu a počítal jsem s tím, že je později budu muset upravovat.

Vložení profilů má práce na modelu neskončila, protože jsem musel veškeré spoje upravit pomocí funkce ořezat. Na obrázku č. 27 jsem znázornil neořezaný a ořezaný spoj.



*Obrázek 27 Neořezaný spoj (vlevo) a ořezaný spoj (vpravo)*

V některých případech bylo třeba nutné materiál naopak prodloužit. Prodloužení je znázorněno na obrázku č. 28.



*Obrázek 28 Spoj upravený prodloužením*

Po úpravě všech spojů byl samotný model rámu hotový. V tabulce materiálů jsem pak každému modelu přiřadil vybraný materiál, a to konstrukční ocel 11 523. Přiřazení materiálu je důležité pro výpočet těžiště rámu a pozdější pevnostní analýzu.

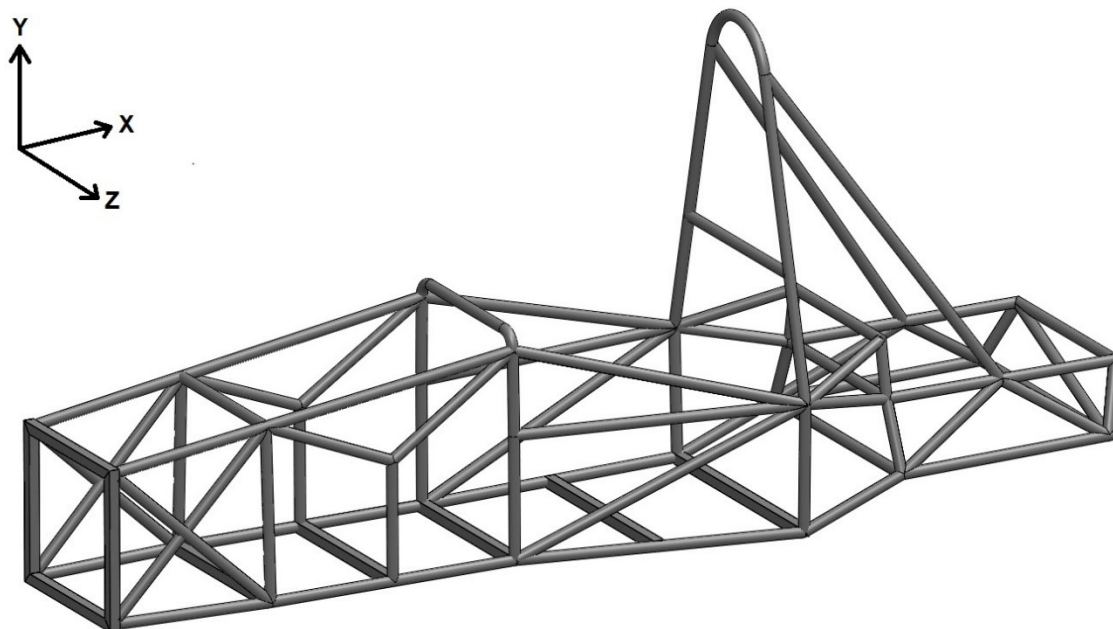
## **6.4 Výsledné návrhy**

Vytváření modelu bylo časově velmi náročné. Než jsem získal návrh modelu použitelného pro další operace, vymodeloval jsem spoustu nevyhovujících konceptů. V této podkapitole jsem uvedl tři nejpodstatnější návrhy.

### **6.4.1 Návrh pro původní nápravy**

První dokončený návrh byl určený pro původní nápravy. Jak jsem již zmiňoval, u přední podpůrné části se mi z důvodu pozice upevnění náprav nepodařilo dodržet doporučené pravidlo triangulace, přesto jsem chtěl model podrobit pevnostní analýze. Po dokončení jsem model

zkontroloval podle všech kontrolních šablon a zjistil jsem, že splňuje konstrukční požadavky soutěže (obr. 29).



*Obrázek 29 Návrh pro původní nápravy*

V tabulce č. 9 jsou uvedeny základní charakteristiky návrhu a v tabulce č.10 jsou uvedeny souřadnice těžiště modelu. Souřadnicový systém je určen podle osového kříže na obrázku č. 29.

Tabulka 9 Základní parametry návrhu

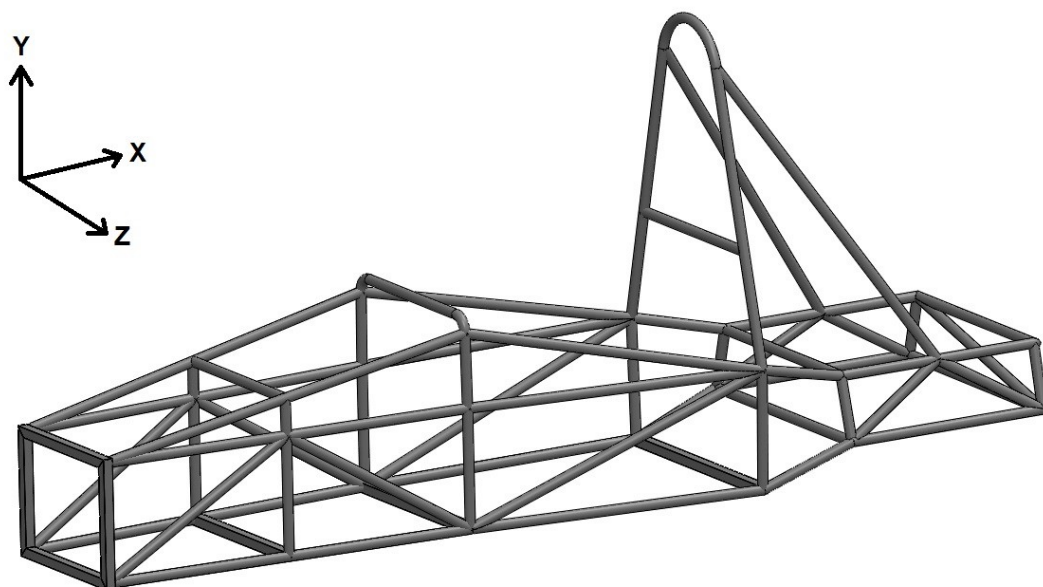
Parametr	Hodnota
Délka (X)	2510 mm
Šířka (Z)	645 mm
Výška (Y)	1169 mm
Hmotnost	36,54 kg

Tabulka 10 Poloha těžiště návrhu

Souřadnice	Hodnota
X	86,71 mm
Y	335,62 mm
Z	0,37 mm

#### 6.4.2 Návrh pro upravené nápravy

Jedná se o první model určený pro upravené nápravy. Kromě přední podpůrné části jsem musel z důvodu upevnění úchytů náprav nepatrně upravit i část zadní a také kokpit pilota. Oproti prvnímu návrhu je tak model celkově delší a širší (obr. 30).



Obrázek 30 Počáteční návrh pro upravené nápravy

V tabulce č. 11 jsou uvedeny základní charakteristiky návrhu a v tabulce č.12 jsou uvedeny souřadnice těžiště modelu. Souřadnicový systém je určen podle osového kříže na obrázku č. 30.

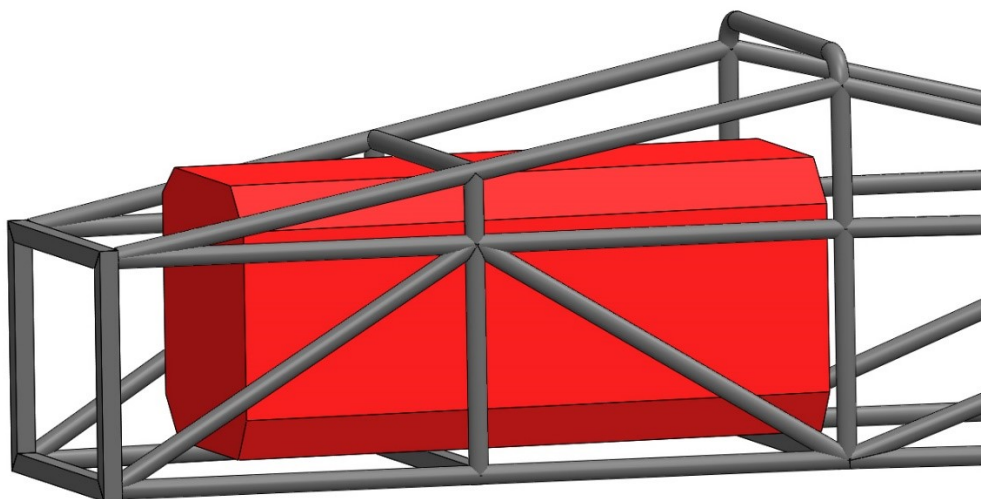
Tabulka 11 Základní parametry návrhu

Parametr	Hodnota
Délka (X)	2575 mm
Šířka (Z)	665 mm
Výška (Y)	1134 mm
Hmotnost	34,59 kg

Tabulka 12 Poloha těžiště návrhu

Souřadnice	Hodnota
X	27,96 mm
Y	338,89 mm
Z	0,23 mm

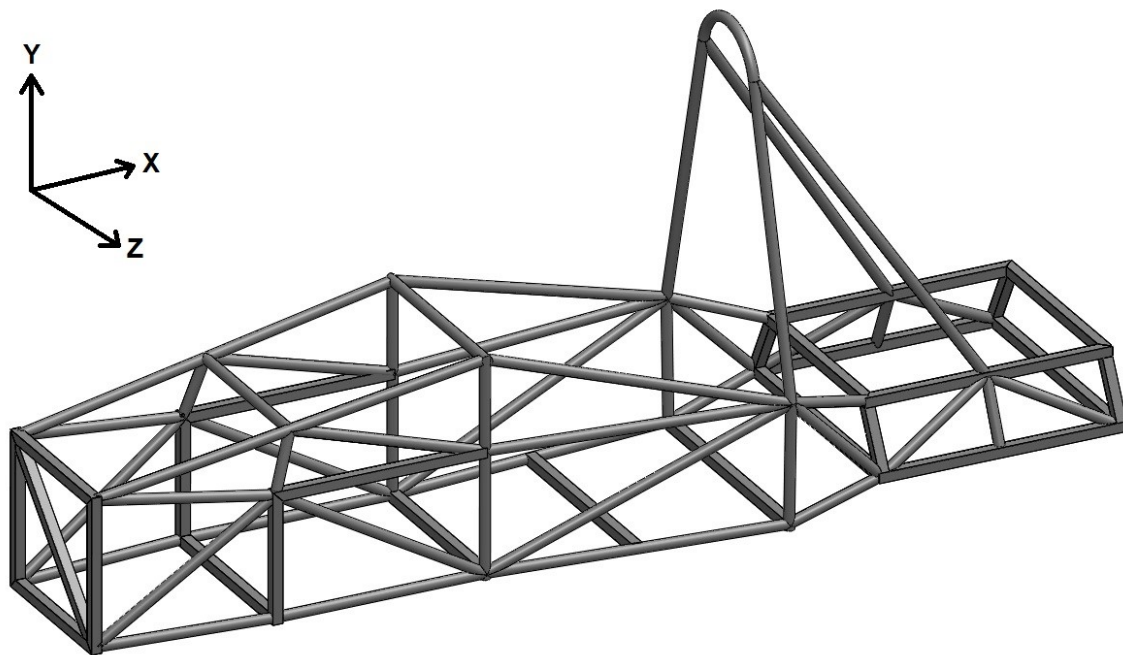
Při kontrole modelu jsem ale narazil na problém. Jednalo se o šablonu kontroly prostoru pro nohy pilota. I když šablona do konstrukce nezasahovala, musel jsem myslet na budoucí laminaci celého vozidla a případné krytí by šabloně překáželo (obr 31.). Model jsem proto ani pevnostní analýze nepodrobil a radši ho přepracoval.



Obrázek 31 Kontrola modelu podle šablony (šablona vyznačena červeně)

Rozhodl jsem se tak model upravit. Kompletně jsem přepracoval přední podpůrnou část a zvětšil přední přepážku, kterou jsem pro jistotu i vyztužil pro budoucí upevnění vybraného

deformačního členu. Pro lepší připevnění úchytů náprav a pohonné jednotky jsem také nahradil několik trubek  $\varnothing 25 \times 1,5$  přední a zadní podpůrné struktury za profily  $25 \times 25 \times 1,5$ . Návrh úspěšně prošel kontrolou podle šablon a vyhovoval všem pravidlům, proto jsem ho podrobil pevnostní analýze (obr. 32).



*Obrázek 32 Konečný návrh pro upravené nápravy*

V tabulce č. 13 jsou uvedeny základní charakteristiky návrhu a v tabulce č. 14 jsou uvedeny souřadnice těžiště modelu. Souřadnicový systém je určen podle osového kříže na obrázku č. 32.

**Tabulka 13** Základní parametry návrhu

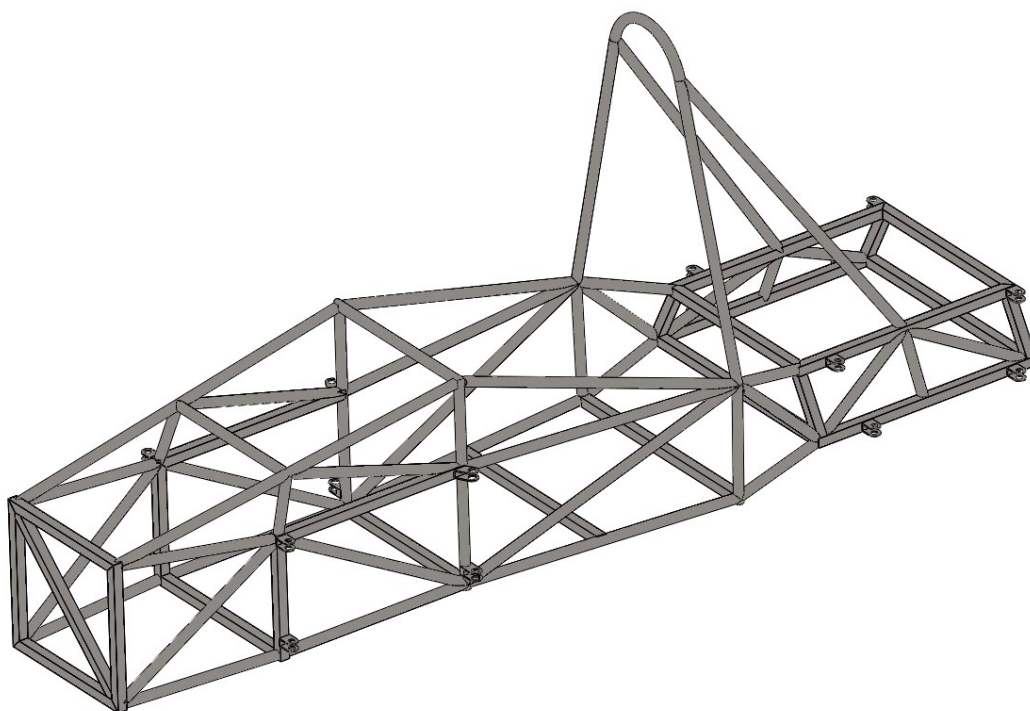
<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
Délka (X)	2510 mm
Šířka (Z)	645 mm
Výška (Y)	1146 mm
Hmotnost	37,41 kg



Tabulka 14 Poloha těžiště návrhu

Souřadnice	Hodnota
X	76,64 mm
Y	340,44 mm
Z	0,01 mm

Jako součást svařované konstrukce jsem konečný model opatřil i úchyty náprav vyrobené z profilu o tloušťce stěn 3 mm (obr. 33).

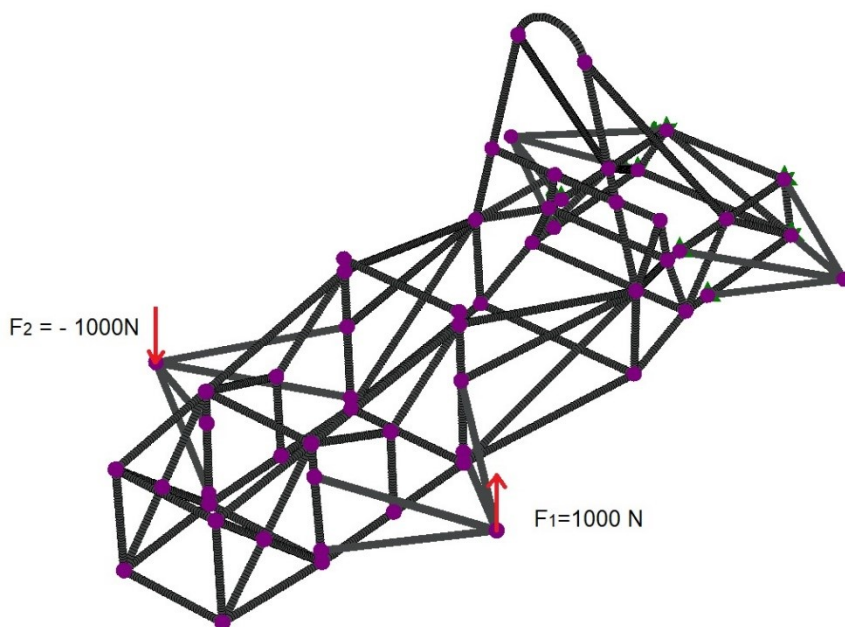


*Obrázek 33 Úchyty náprav*

## 7. Pevnostní analýza návrhu

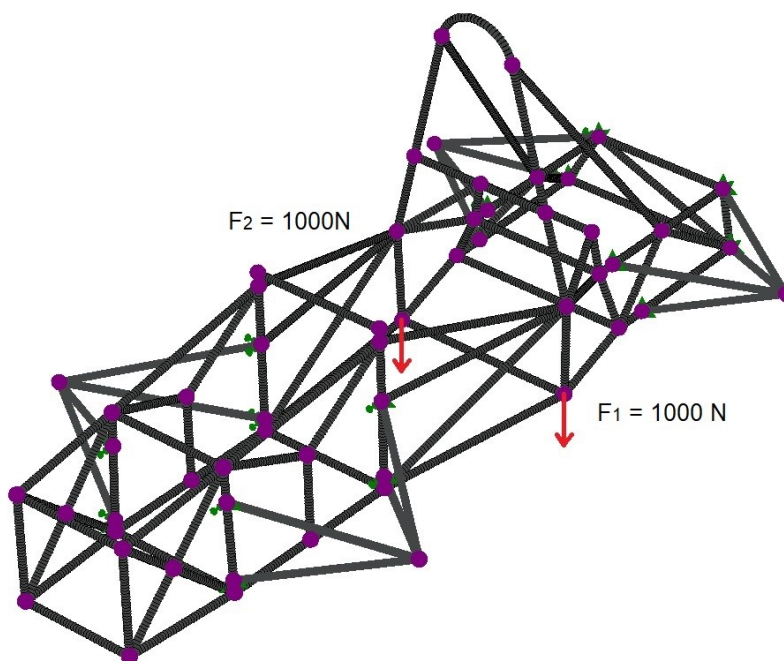
Výsledné návrhy jsem podrobil pevnostní analýze rovněž pomocí softwaru Solid Works 2019. V simulacích jsem si tak vytvořil novou statickou analýzu, ve které jsem mohl model podrobit různým typům zatížení. Nejdříve jsem ale musel model pro simulaci připravit. Začal jsem s vytvořením podpor v místech uchycení náprav k rámu, pomocí kterých jsem model fixoval nebo na něj aplikoval různé síly. Prostřednictvím funkce skupina spojů jsem si poté zobrazil veškeré svárové spoje, které jsem tak mohl zkontrolovat a případně upravit. Nejdůležitějším krokem bylo ale definování prvků rámu podle působení sil. Veškeré prvky rámu jsem tak z důvodu axiálního i radiálního namáhání definoval jako nosník (beam). Podpory pak byly nastaveny jako prut (truss), protože musejí odolat pouze axiálnímu namáhání. Následně jsem mohl na rám aplikovat síly, nebo jej fixovat podle dvou typů zatížení.

Nejdříve jsem rám zatížil krutem. K tomuto namáhání dochází v případě, pokud se jedno kolo přední nebo zadní nápravy nachází v jiné výšce než to druhé. Dochází tak k takzvanému torznímu namáhání celé rámové konstrukce. Abych takového namáhání docílil, pevně jsem fixoval zadní podporu a na přední podporu jsem v ose y působil dvěma silami o hodnotě 1000 N v opačných směrech, které odpovídají 300 kg neboli celkové hmotnosti formule (obr. 34).



Obrázek 34 Zatížení krutem

Druhým typem zatížení je ohybové namáhání, ke kterému dochází neustále působením celkové hmotnosti formule. Opět jsem tak zatížil rám v opačném směru osy y silou 1000 N v nejspodnějším svarovém spojení hlavního oblouku. Rám byl pak fixován v místě připojení zadní a přední nápravy (obr. 35).

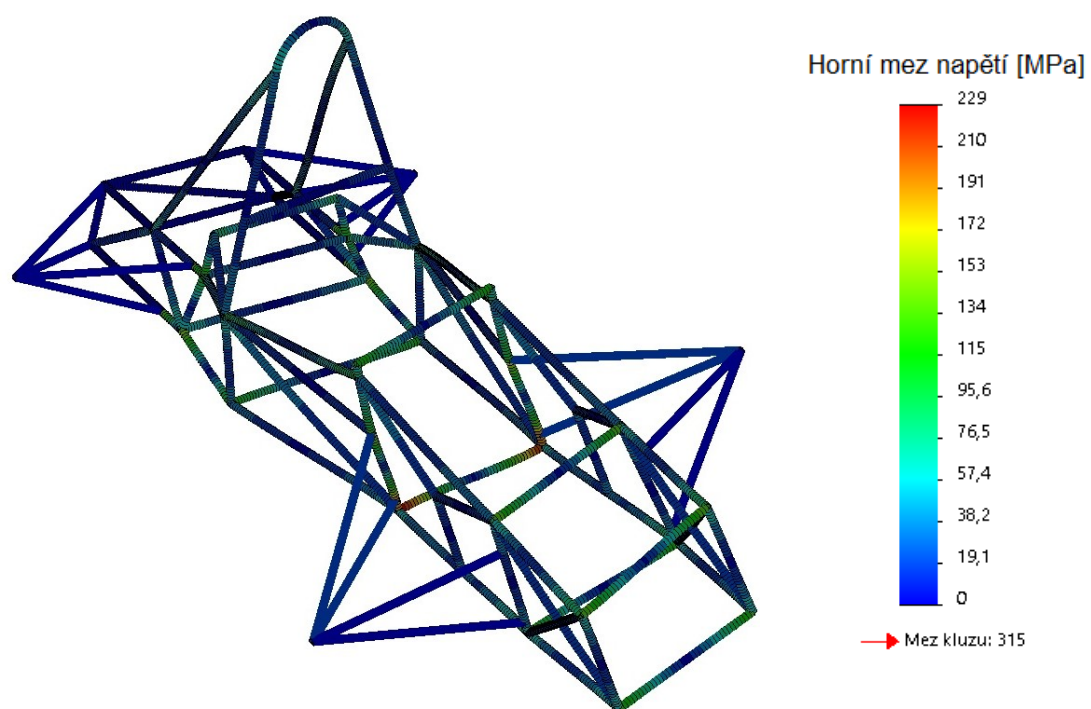


*Obrázek 35 Zatížení ohybem*

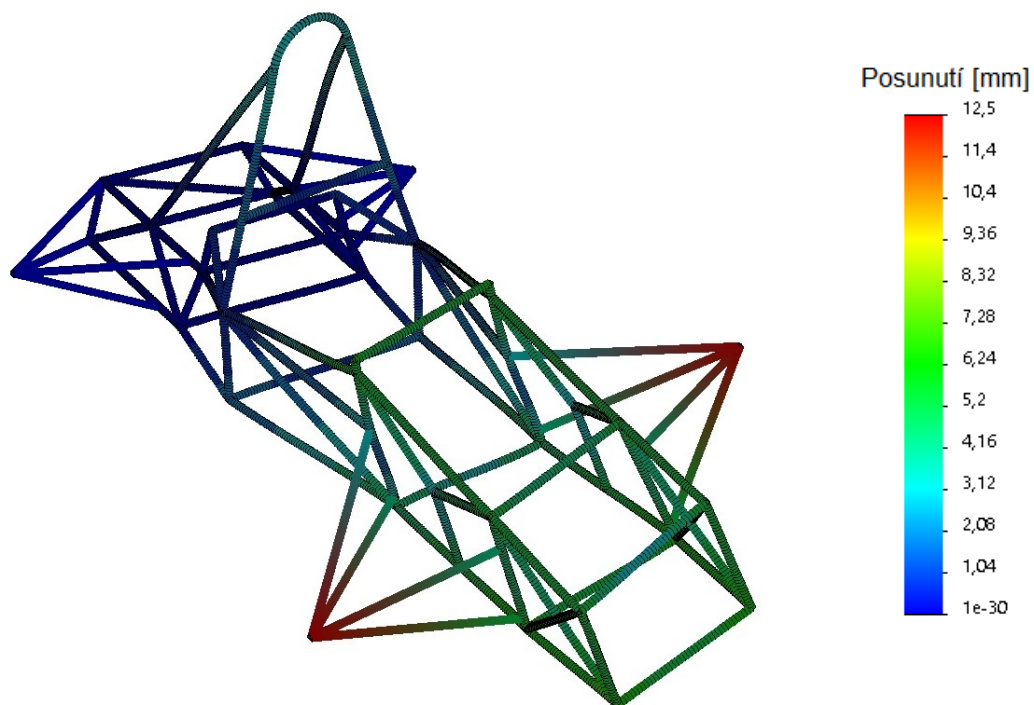
Výsledkem těchto simulací byly grafy namáhání celkové konstrukce a posunutí jednotlivých bodů vůči původní poloze. Pomocí těchto dat tak mohu zjistit maximální namáhání a také jestli nedošlo k překročení meze kluzu. Informace o posunutí jednotlivých bodů rámu jsou pak důležité k náročnějším operacím, jako je výpočet torzní tuhosti rámu. Tímto výpočtem se ale v mé bakalářské práci z důvodu rozsáhlosti nebudu zabývat.

### **7.1 Analýza rámu pro původní nápravy**

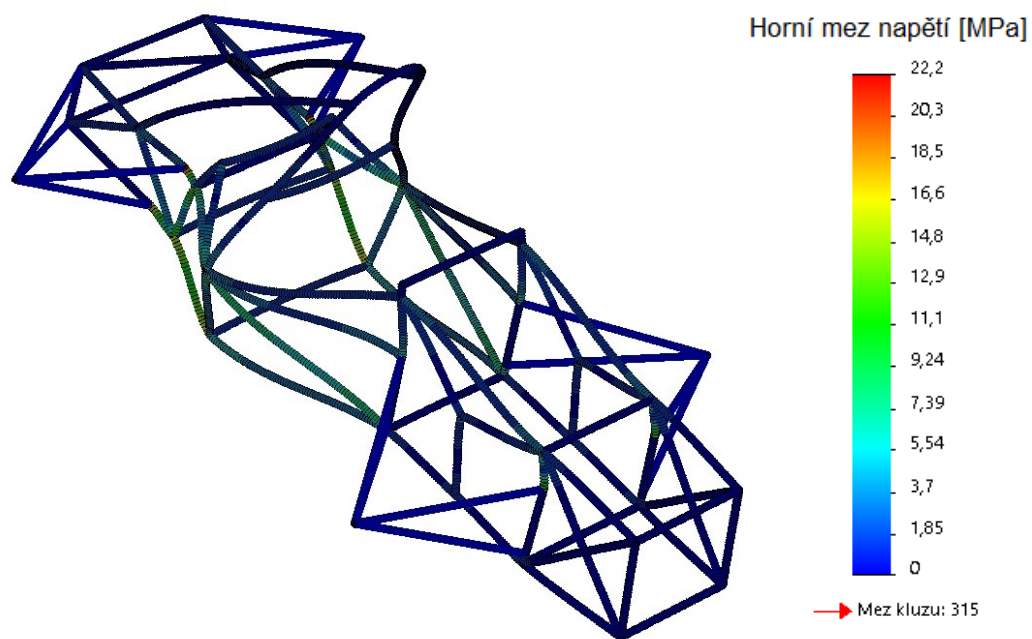
Z grafu na obrázku č. 36 je patrné, že největší napětí při zatížení v krutu působí v předním oblouku a dosahuje hodnoty  $229 \text{ N/mm}^2$ . Z grafu na obrázku č. 37 můžeme vyčíst, že k největšímu posunutí dochází v podporách v místě působení sil. Na obrázku č. 38 se nachází výsledný graf zatížení v ohybu, ze kterého můžeme vyčíst, že největší napětí působí v místě připojení zadní podpory a dosahuje hodnoty  $22,2 \text{ N/mm}^2$ , a k největšímu posunutí pak dochází na horní části hlavního oblouku, jak je znázorněno na obrázku č. 39.



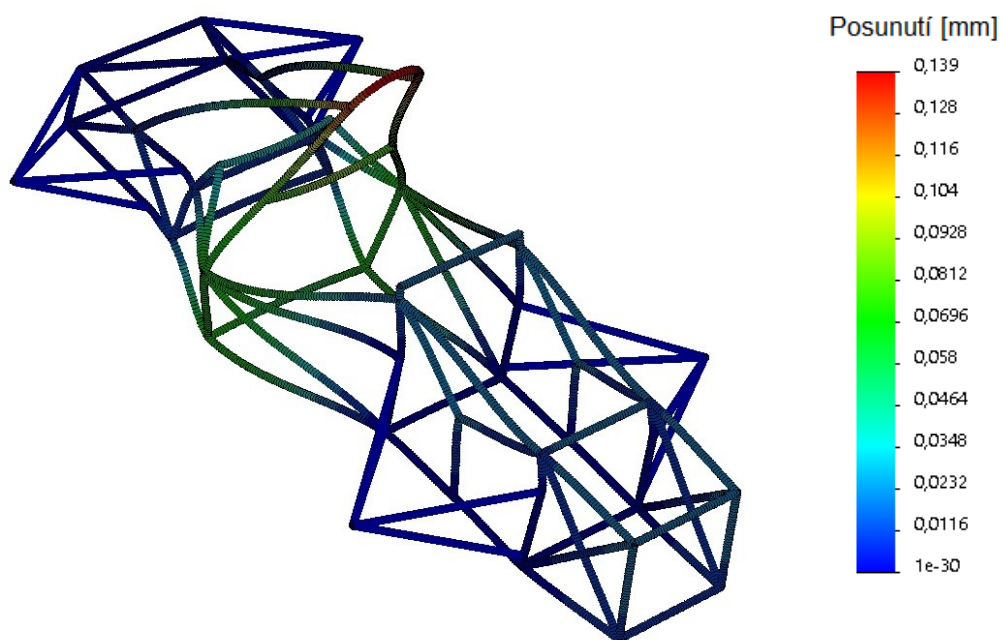
Obrázek 36 Zatížení krutem – graf napětí



Obrázek 37 Zatížení krutem – graf posunutí



Obrázek 38 Zatížení ohybem – graf napětí

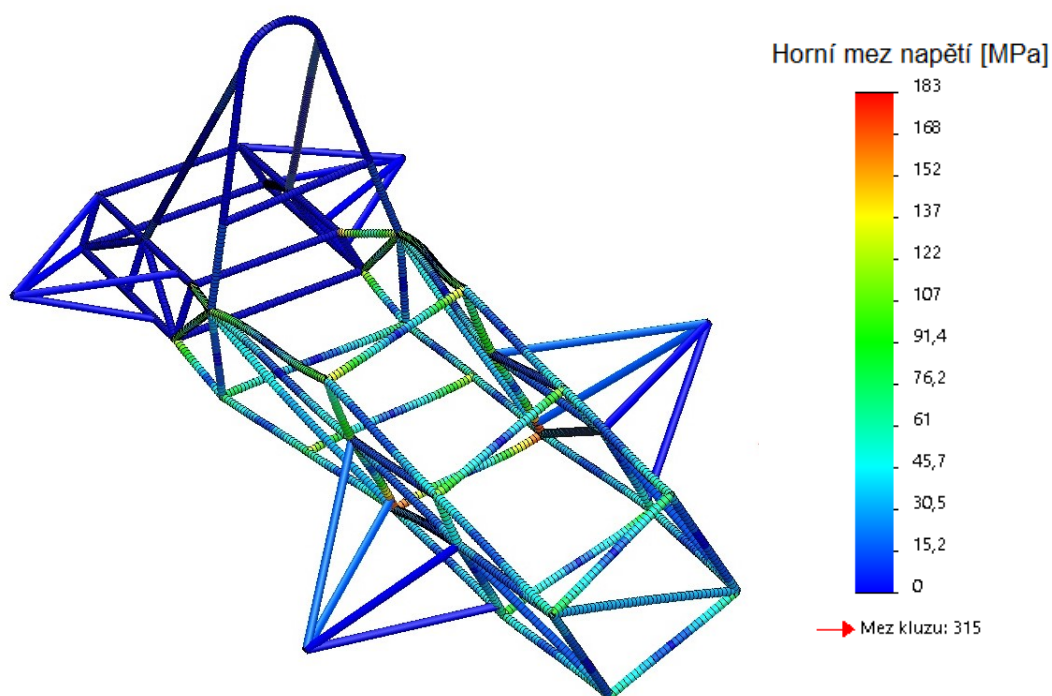


Obrázek 39 Zatížení ohybem – graf posunutí

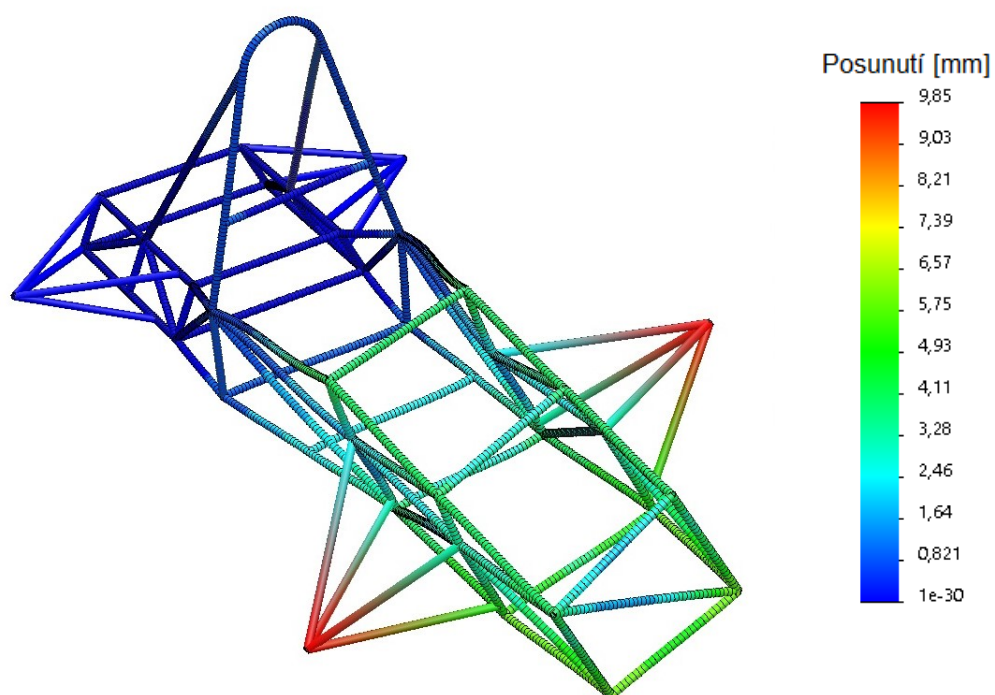


## 7.2 Analýza rámu pro upravené nápravy

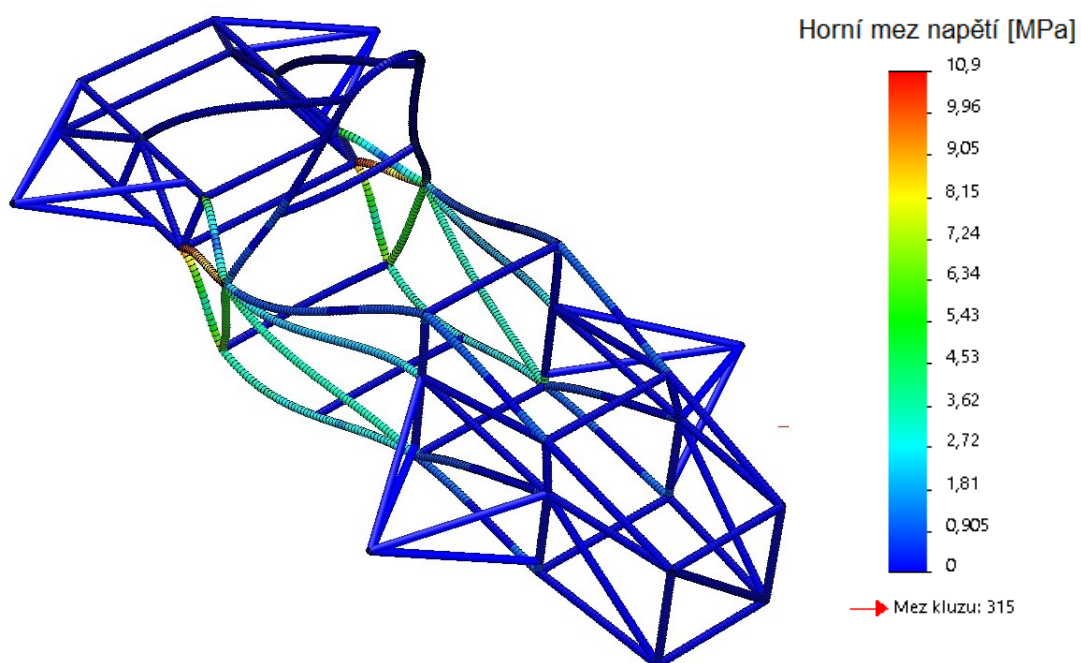
Z grafu na obrázku č. 40 lze vyčíst, že nejvyšší dosažené napětí při zatížení v krutu, o hodnotě  $183 \text{ N/mm}^2$ , působí rovněž ve spodní části předního oblouku. Největší posunutí vzniká znovu v místě působení sil na předních podporách, jak je vidět na obrázku č. 41. Výsledek ohybového zatížení je zaznamenán na obrázku č. 42, ze kterého je patrné, že největší napětí dosahující hodnoty  $10,9 \text{ N/mm}^2$  působí v místě uchycení zadních podpor k rámu. Největší posunutí při tomto zatížení vzniká opět v horní části hlavního oblouku. Jak je znázorněno na obrázku č. 43.



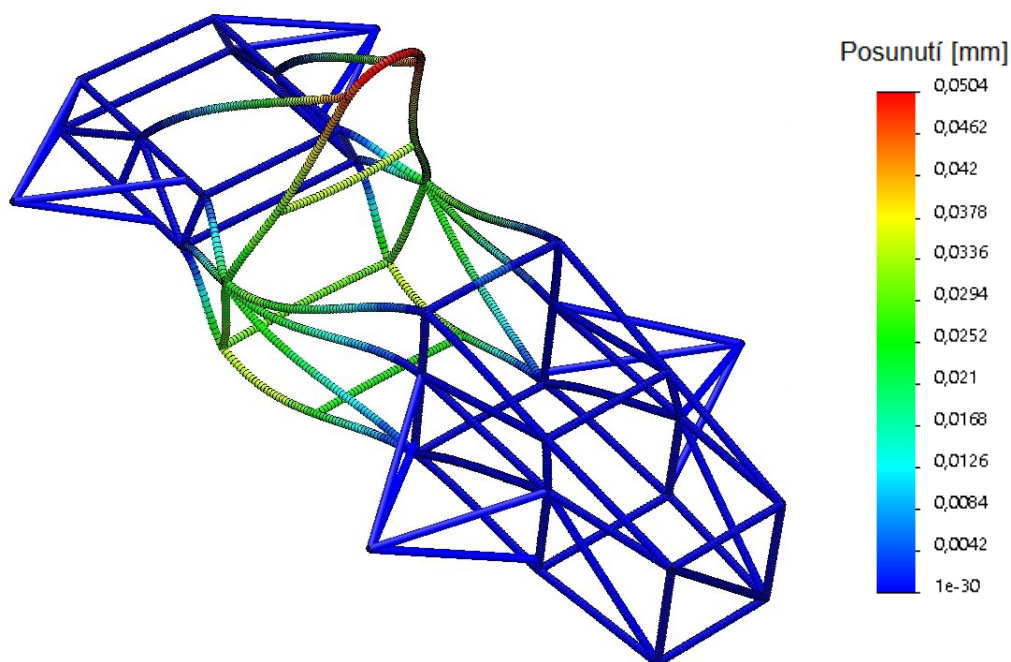
Obrázek 40 Zatížení krutem – graf napětí



Obrázek 41 Zatížení krutem – graf posunutí



Obrázek 42 Zatížení ohybem – graf napětí



Obrázek 43 Zatížení ohybem – graf posunutí

### 7.3 Výpočet torzní tuhosti a srovnání výsledků

Provedením simulace zatížení krutem jsem získal hodnotu posuvu  $\Delta z$ . Mohl jsem tak vypočítat torzní tuhost rámu a oba návrhy tak porovnat.

Začal jsem s rámem pro původní nápravy. Vypočítal jsem úhel zkroucení podle vzorce (1):

$$\varphi = \arctan \left( \frac{\Delta z}{\frac{1}{2} \times t} \right) = \arctan \left( \frac{12,43}{\frac{1}{2} \times 1300} \right) = 1,096^\circ$$

Kroutící moment podle vzorce (2):

$$M_k = \frac{1}{2} \times t \times (F_1 + F_2) = \frac{1}{2} \times 1300 \times (1000 + 1000) = 1300000 \text{ Nmm} = 1300 \text{ Nm}$$

Torzní tuhost podle vzorce (3):

$$K = \frac{M_k}{\varphi} = \frac{1300}{1,096} = 1186,13 \frac{\text{Nm}}{^\circ}$$



Poté jsem pokračoval s rámem pro upravené nápravy. Vypočítal jsem úhel zkroucení podle vzorce (1):

$$\varphi = \arctan \left( \frac{\Delta z}{\frac{1}{2} \times t} \right) = \arctan \left( \frac{9,75}{\frac{1}{2} \times 1300} \right) = 0,859^\circ$$

Krouticí moment podle vzorce (2):

$$M_k = \frac{1}{2} \times t \times (F_1 + F_2) = \frac{1}{2} \times 1300 \times (1000 + 1000) = 1300000 \text{ Nmm} = 1300 \text{ Nm}$$

Torzní tuhost podle vzorce (3):

$$K = \frac{M_k}{\varphi} = \frac{1300}{0,859} = 1513,39 \frac{\text{Nm}}{^\circ}$$

Po analýze obou rámu jsem dosáhl potřebných výsledků a mohl jsem oba návrhy porovnat. V tabulce č. 15 se nacházejí hodnoty maximálního napětí  $\tau_{K\max}$  a  $\sigma_{O\max}$ , maximálního posunutí  $\mu_{\max}$  obou návrhů a jejich torzní tuhosti. Z těchto dat je zřejmé, že rám pro upravené nápravy, dosahuje mnohem lepších výsledků než návrh pro původní nápravy, u kterého se mi nepodařilo řádně dodržet pravidlo triangulace. Z tohoto důvodu jsem vybral rám pro upravené nápravy jako první hotový návrh, připravený pro další operace a úpravy.

Tabulka 15 Porovnání návrhů

	$\tau_{K\max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\mu_{K\max}$ [mm]	$\sigma_{O\max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\mu_{O\max}$ [mm]	K [Nm/°]
<b>Rám pro původní nápravy</b>	223	12,49	22,2	0,1392	1186,13
<b>Rám pro upravené nápravy</b>	183	9,85	10,9	0,0504	1513,39

Při navrhování budoucí generace rámu doporučuji zůstat u příhradové konstrukce a pracovat na jejím zdokonalení. Výsledky pevnostní analýzy odhalily vyšší napětí ve spodní části předního oblouku při namáhání v krutu u obou návrhů, a proto doporučuji zesílení této oblasti. Doporučoval bych také lepší provedení připojení zadní podpůrné struktury k hlavnímu oblouku, jelikož ohybová analýza odhalila vyšší napětí i v této oblasti. Důležité je i pracovat s alternativními rozměry a materiálem pro dosažení co nejnižší hmotnosti celé konstrukce.

## 8. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout model rámu elektrické formule v rámci mezinárodní vysokoškolské soutěže Formula Student a provést jeho pevnostní analýzu. Model rámu jsem navrhoval v softwaru Solid Works 2019 jednak podle pravidel soutěže, ale taky podle ostatních komponentů.

V teoretické části mé práce jsem se zabýval typy rámu používanými v současnosti. Pro můj návrh byla vybrána příhradová konstrukce, která je z důvodů konstrukční i finanční nenáročnosti vhodnou volbou pro první generace rámu. Práci jsem proto doplnil i o pravidla soutěže pro stavbu příhradového konstrukce.

Prvním krokem byl výběr vhodného materiálu z katalogu podle požadavků soutěže na základní materiál. Konstrukční, lehce svařitelná ocel ČSN 11 523, která splňovala mechanické požadavky i chemické složení, tak byla jasnou volbou. Jednotlivým prvkům rámu byly poté přiřazeny určité profily, doložené kontrolním výpočtem plošné setrvačnosti.

Tvorba modelu započala extrahováním bodů úchytů náprav formule a načrtnutím kontrolních šablon, které zajišťují bezpečnost pilota. Při vytváření skici rámu jsem však zjistil, že nápravy příliš zasahují do prostoru pro nohy pilota a konstrukce rámu tak nemohla splňovat pravidla soutěže. Jedná se však o první návrh rámu i náprav, a proto jsem si body úchytů lehce upravil. Mohl jsem tak vytvořit skicu rámu, ze které jsem vkládáním různých profilů vytvořil objemový model pro upravené nápravy, ale také pro nápravy původní.

Vytvořené modely byly následně zatěžovány v pevnostní analýze krutem a ohybem. Výsledkem pak byly grafy napětí a posunutí. Nejdůležitější byl graf posunutí při zatěžování v krutu, ze kterého jsem mohl vyčíst údaje potřebné pro výpočet torzní tuhosti, a mohl jsem tak rámy porovnat. Výsledná torzní tuhost rámu pro původní nápravy dosahovala hodnoty  $K = 1186,13 \text{ Nm/}^\circ$ . Torzní tuhost rámu pro nápravy upravené pak dosahovala mnohem lepší hodnoty  $K = 1513,39 \text{ Nm/}^\circ$ , proto je tento návrh jasnou volbou pro budoucí sestavu formule.

## Seznam použité literatury

- [1] Formula Student Rules 2020 [online]. 2020 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2020/rules/FS-Rules\\_2020\\_V1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf)
- [2] Formula Student: VSB – TU OSTRAVA CZECH REPUBLIC [online]. 2015 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <http://formula.vsb.cz/cs/>
- [3] PAUER, Václav. Vývoj konstrukce závodních vozů: Vše podstatné z historie techniky formulových vozů. Praha: Grada Publishing, 2011.
- [4] DALHOUSIE FORMULA SAE [online]. 2015 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://blogs.dal.ca/formulaSAE/>
- [5] Formula Electric Belgium: Green innovation meets performance [online]. 2015 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://formulaelectric.be/>
- [6] DANIELSSON, OSKAR. *Influence of Body Stiffness on Vehicle Dynamics Characteristics in Passenger Cars: Master's thesis in Automotive Engineering* [online]. Göteborg, Švédsko, 2015 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/219391/219391.pdf>. Master's thesis. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- [7] Forlit & Metal [online]. 2018 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.fmetal.cz/cz/>.
- [8] Jakosti ocelí. Feromat: Hutní a spojovací materiály [online]. 2010 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: [http://www.feromat.cz/jakosti\\_oceli](http://www.feromat.cz/jakosti_oceli)
- [9] Zacha: Velkoobchod s hutním materiálem [online]. 2017 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.zacha.cz/>
- [10] MUK, Jiří. Statika I. Vyd. 2. V Praze: nakladatelství ČVUT, 2007
- [11] SANDLER, Jakub. *Návrh zavěšení kol Formula Student: Design of Formula Student Suspension System* [online]. Ostrava, 2020 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/140823>. Bakalářská práce. VŠB – TUO. Vedoucí práce Ing. Miroslav Suchánek.
- [12] ČADA, R. Technologie I: Zákony plastické deformace kovů, dělení materiálů, slévání: skriptum. 1. vyd. Ostrava: VŠB – TUO, 2007.
- [13] ŠKAPA, Petr. Bezpečnost a zkoušení vozidel. Ostrava: VŠB – TUO, 2005.

- [14] FORMULA SAE [online]. [cit. 2020-05-07]. Dostupné z:  
<https://www.fsaeonline.com/>

## Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 Příhradová konstrukce týmu Dalhousie Formula SAE [4]</i> .....	4
<i>Obrázek 2 Uhlíkový monokok formule Umicore Eclipse [5]</i> .....	5
<i>Obrázek 3 Kombinovaný rám [4]</i> .....	5
<i>Obrázek 4 Schéma zatížení rámu krutem []</i> .....	6
<i>Obrázek 5 Princip triangulace (vlevo správně, vpravo špatně) [1]</i> .....	8
<i>Obrázek 6 Šroubové spojení trubek [1]</i> .....	8
<i>Obrázek 7 Hlavní oblouk</i> .....	9
<i>Obrázek 8 Vzpěry hlavního oblouku</i> .....	9
<i>Obrázek 9 Přední oblouk</i> .....	10
<i>Obrázek 10 Vzpěry předního oblouku</i> .....	10
<i>Obrázek 11 Přední přepážka</i> .....	11
<i>Obrázek 12 Podpora přední přepážky</i> .....	11
<i>Obrázek 13 Boční nárazová oblast</i> .....	12
<i>Obrázek 14 Šablona prostoru pro nohy [1]</i> .....	13
<i>Obrázek 15 Šablona vstupu do kokpitu [1]</i> .....	13
<i>Obrázek 16 Šablona 95 % člověka [1]</i> .....	14
<i>Obrázek 17 Pozice pilotovy hlavy vůči hlavnímu oblouku [1]</i> .....	15
<i>Obrázek 18 Rozměry standartního deformačního členu [10]</i> .....	18
<i>Obrázek 19 Případné vyztužení přepážky [10]</i> .....	18
<i>Obrázek 20 3D skica přední a zadní nápravy</i> .....	22
<i>Obrázek 21 Kontrolní šablony</i> .....	23
<i>Obrázek 22 rozmístění prvků rámu</i> .....	24
<i>Obrázek 23 Zadní podpůrná struktura</i> .....	25
<i>Obrázek 24 Přední podpůrná struktura</i> .....	26
<i>Obrázek 25 Přední podpůrná struktura – upravená náprava</i> .....	27
<i>Obrázek 26 Skica rámu</i> .....	28
<i>Obrázek 27 Neořezaný spoj (vlevo) a ořezaný spoj (vpravo)</i> .....	29
<i>Obrázek 28 Spoj upravený prodloužením</i> .....	29
<i>Obrázek 29 Návrh pro původní nápravy</i> .....	30
<i>Obrázek 30 Počáteční návrh pro upravené nápravy</i> .....	31
<i>Obrázek 31 Kontrola modelu podle šablony (šablona vyznačena červeně)</i> .....	32
<i>Obrázek 32 Konečný návrh pro upravené nápravy</i> .....	33

Obrázek 33 Úchyty náprav .....	34
Obrázek 34 Zatížení krutem .....	35
Obrázek 35 Zatížení ohybem.....	36
Obrázek 36 Zatížení krutem – graf napětí .....	37
Obrázek 37 Zatížení krutem – graf posunutí .....	37
Obrázek 38 Zatížení ohybem – graf napětí .....	38
Obrázek 39 Zatížení ohybem – graf posunutí .....	38
Obrázek 40 Zatížení krutem – graf napětí .....	39
Obrázek 41 Zatížení krutem – graf posunutí .....	40
Obrázek 42 Zatížení ohybem – graf napětí .....	40
<i>Obrázek 43 Zatížení ohybem – graf posunutí.....</i>	<i>41</i>

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Minimální vlastnosti oceli .....	15
Tabulka 2 Minimální rozměry profilů a trubek .....	15
Tabulka 3 Složení oceli 11 523 .....	19
Tabulka 4 Mechanické vlastnosti oceli 11 523 .....	19
Tabulka 5 Rozměry profilů a trubek .....	20
Tabulka 6 Uchycení přední nápravy .....	21
Tabulka 7 Uchycení zadních náprav .....	22
Tabulka 8 Upravené úchyty přední nápravy .....	26
Tabulka 9 Základní parametry návrhu .....	30
Tabulka 10 Poloha těžiště návrhu .....	31
Tabulka 11 Základní parametry návrhu .....	32
Tabulka 12 Poloha těžiště návrhu .....	32
Tabulka 13 Základní parametry návrhu .....	33
Tabulka 14 Poloha těžiště návrhu .....	34
Tabulka 15 Porovnání návrhů .....	42

# Příloha č. 1 Materiálová karta ocel ČSN 11 523

ČSN 11523 – konstrukční ocel



## 1. Orientační srovnání se zahraničními normami

DIN	EN 10027-1	EN 10027-2	EN 10025:90	GOST
St52-3	S35530	1.0553	Fe510C1	17GS

## 2. Chemické složení (rozbor tavby) v %

C	Mn	Si	P	S	N	Al
max. 0,200	max. 1,600	max. 0,550	max. 0,050	max. 0,045		max. 0,015

## 3. Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti	Provedení	
	tepelně nezpracované	normalizačně žíhané
Pevnost v tahu $R_m$ [MPa]		510 - 680
Mez kluzu $R_e$ [MPa]		min. 355
Tažnost $A_{10}$ [%]		min. 22

## 4. Charakteristika oceli a příklady použití

Mostní a jiné svařované konstrukce, součásti strojů, automobilů, motocyklů a jízdních kol. Součásti tepelných energetických zařízení a tlakových nádob.